

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет Інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра Автоматики та управління в технічних системах

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Ролік О. І.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ грудня _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології

на тему: _____ «Система автоматизованої кореєстрації оптичних та радарних супутни-
кових знімків земної поверхні» _____

Виконав: студент 6-го курсу, групи _____ ІА-82мп
(шифр групи)

_____ Царенок Юлія Юріївна
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник _____ к.т.н, доцент каф. АУТС, Писаренко А. В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без відпо-
відних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
**«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) _____
(повна назва)

Кафедра _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Царенок Юлія Юріївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Система автоматизованої кореєстрації оптичних та радарних супутникових знімків земної поверхні

науковий керівник дисертації _____ ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження супутникові знімки

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) кореєстрація оптичних та радарних супутникових знімків

5. Перелік завдань, які потрібно розробити описати об'єкт і предмет дослідження, провести аналіз існуючих алгоритмів, розробити модифікований алгоритм кореєстрації оптичних і супутникових знімків Землі, розробити програмну реалізацію модифікованого алгоритму кореєстрації

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу 34 рисунки, 38 таблиць, 8 додатків

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Дата видачі завдання 05.09.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Опис об'єкту і предмету дослідження	06.09.19 – 15.10.19	
2	Огляд існуючих систем	16.10.19 – 25.10.19	
3	Розроблення алгоритму	26.10.19 – 10.11.19	
4	Реалізація алгоритму	11.11.19 – 29.11.19	
5	Розроблення стартап-проекту	30.11.19 – 02.12.19	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Незважаючи на зростаючий інтерес до спільного використання оптичних і радарних знімків, проблема їх кореєстрації залишається актуальною.

Метою магістерської дисертації є розроблення модифікованого алгоритму для підвищення якості кореєстрації оптичних і супутникових знімків. Для досягнення мети було виконано наступні завдання: проаналізовано об'єкт та предмет дослідження, проведено аналіз існуючих методів кореєстрації, визначено вимоги до системи, створено модифікований алгоритм кореєстрації, реалізовано програмне забезпечення на основі розробленого алгоритму та проведено аналіз для реалізації проекту як стартапу.

Об'єктом дослідження є супутникові знімки.

Предметом дослідження є кореєстрація оптичних і радарних супутникових знімків.

Результати магістрескої дисертації впроваджені та активно використовуються ТОВ «АГРО ФЛОУ СИСТЕМ».

Ключові слова: кореєстрація, супутникові дані, дистанційне зондування землі, оптико-електронні знімки, радіолокаційні знімки, методи визначення ключавих точок зображення.

ABSTRACT

Despite the growing interest in sharing optical and radar images, the problem of registering them remains relevant.

The purpose of the master's thesis is to develop a modified algorithm for improving the quality of registration of optical and satellite images. To achieve this goal, the following tasks were performed: the object and subject of the study were analyzed, the existing methods of registration were analyzed, the requirements for the system were determined, the modified algorithm of registration was created, the software was developed on the basis of the developed algorithm, and the analysis was carried out for realization. project as a startup.

The object of the study is satellite imagery.

The subject of the study is the registration of optical and radar satellite images.

The results of the master's thesis are implemented and are being actively used by AGRO FLOW SYSTEM LLC.

Keywords: coregistration, satellite data, remote ground sensing, optical-electronic images, radar images, methods of determining key-points of the image.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ОПИС ОБ'ЄКТУ.....	11
1.1 Дані дистанційного зондування Землі.....	11
1.1.1 Оптико-електронне зондування.....	11
1.1.2 Радіолокаційне зондування	13
1.2 Характеристика систем дистанційного зондування.....	19
1.2.1 Історія розвитку систем дистанційного зондування.....	19
1.2.3 Тенденції розвитку систем дистанційного зондування	26
1.3 Проблеми оброблення супутникових знімків.....	34
1.4 Вимоги до супутникових знімків	37
2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ	42
2.1 Опис методів корегістрації	42
2.2 Аналіз точності роботи алгоритмів кореєстрації за допомогою пакету MATLAB.....	52
3 РОЗРОБЛЕННЯ МОДИФІКОВАНОГО АЛГОРИТМУ КОРЕЄСТРАЦІЇ	64
3.1 Постановка проблеми.....	64
3.2 Вимоги до системи	66
3.2.1 Перелік аспектів, що впливають на кореєстрацію.....	66
3.2.2 Структурна схема.....	67
3.3 Модифікований алгоритм	68
3.3.1 Попередня обробка.....	68
3.3.2 Визначення схожих областей на зображеннях для подальшої кореєстрації.....	70
3.3.3 Трансформація пікселів.....	71
3.3.4 Кореєстрація	72
4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	77

5	СТАРТАП	87
5.1	Опис ідеї проекту	87
5.2	Технологічний аудит ідеї проекту	88
5.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	89
5.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	99
	ВИСНОВКИ.....	103
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	106

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі

ДДЗ – дані дистанційного зондування

SAR - synthetic-aperture radar, радар із синтезованою апертурою

DEM - digital elevation model, цифрова модель місцевості

ВСТУП

Одним з пріоритетних напрямів досліджень в галузі штучного інтелекту можна назвати комп'ютерний зір. Дослідження методів комп'ютерного зору є актуальним, оскільки для ефективного виконання завдань роботам та автоматичним системам необхідно отримувати дані про навколишній світ. Одним із факторів впливу на розвиток штучного інтелекту є розроблення алгоритмів розпізнавання та аналізу контурів об'єктів на зображеннях.

Важливою задачею у процесі розпізнавання об'єктів є задача співставлення зображень.

Задача співставлення зображень вирішується у таких випадках:

- створення панорам;
- створення стереопари та реконструкція тривимірної моделі за його двомірними проекціями;
- розпізнавання об'єктів та пошук по образу;
- відстеження руху об'єкта;
- реконструкція афінних зображень;
- співставлення супутникових знімків.

У магістерській дисертації вирішується задача співставлення даних дистанційного зондування Землі – супутникових знімків, коли необхідне оброблення декількох сцен, отриманих у різний час, з різних сенсорів, за різних умов. Співставлення супутникових знімків називається кореєстрацією.

За останні десятиліття обсяг, різноманітність і якість матеріалів дистанційного зондування істотно зросли. Основна мета використання даних дистанційного зондування Землі (ДДЗ) – отримання корисної інформації про стан навколишнього середовища та використання земель, прогноз врожаю сільськогосподарських культур, оцінка наслідків стихійних лих, використання в оптичній навігації систем безпілотних літаючих апаратів, використання у військовій галузі і т.д.

Існує ряд програм за допомогою яких можливо частково вирішити проблему кореєстрації супутникових знімків. Однак при більш детальному розгляді, виявляється що більшість з них мають ті чи інші неточності, і потребують фундаментальної перевірки інваріантності двомірних моментів. Проблема полягає також в алгоритмах на яких базуються такі програми. Відомо, що при роботі більшості з них в процесі корегістрації не враховуються наступні проблемні ситуації.

Використовується один метод і дескриптор для всіх зображень. Якщо на панорамі буде кілька типів зображень, наприклад, на супутниковому знімку присутні архітектурні споруди та ліс і вся ділянка має нерівномірний рельєф. Більшість програм буде склеювати все одним способом.

Існуючі алгоритми формування зображень розраховані на роботу зі статичними зображеннями. Це означає, що без доопрацювання існуючі алгоритми не дозволяють формувати зображення в режимі реального часу.

Існуючі алгоритми показують хороші результати при помітному перетині зображених сцен, що означає небажане збільшення числа знімків.

Не враховується вплив паралаксу (різниця кутового положення об'єкту на різних відстанях).

Не враховується часткове попадання об'єктів на зображення. У системах розподіленого відеомоніторингу (наприклад відеореєстрація транспортних засобів, аеропортів і т.д.) у випадку використання декількох камер з секторами огляду, що перекриваються формуються багаторакурсні зображення або панорами. Камери розміщуються чітко між полосами. Але якщо машина їде по самій полосі, вона частково попадає в кут огляду двох камер. Значить з'являється проблема співставлення двох зображень з «розрізаним» об'єктом.

Тому залишається необхідність у створенні системи, в якій спочатку буде визначатися тип зображень (методи сегментації), а потім буде визначатися метод знаходження основних точок і їх опису, після чого відбудеться заставлення кадрів з мінімальними помилками.

1 ОПИС ОБ'ЄКТУ

1.1 Дані дистанційного зондування Землі

Виділяють два напрямки отримання просторової інформації про земну поверхню з космосу: зйомка в видимому і інфрачервоному діапазонах довжин електромагнітних хвиль (оптико-електронні системи) і зйомка в сантиметровому радіодіапазоні (радарні системи) [1].

1.1.1 Оптико-електронне зондування

Оптико-електронні супутникові системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяють отримувати просторову інформацію про земну поверхню у видимому і інфрачервоному діапазонах довжин електромагнітних хвиль (рис. 1.1). Вони здатні розпізнавати пасивне відбите випромінювання земної поверхні у видимому та інфрачервоному діапазонах. У таких системах випромінювання потрапляє на відповідні датчики, що генерують електричні сигнали в залежності від інтенсивності випромінювання.

У оптико-електронних системах ДЗЗ, як правило, використовуються датчики з постійним скануванням по рядам. Можна виділити лінійне, поперечне і поздовжнє сканування.

Повний кут сканування поперек маршруту називається кутом огляду, а відповідна величина на поверхні Землі – шириною смуги зйомки.

Частина прийнятого з супутника потоку даних називається сценою. Схеми нарізки потоку на сцени, так само як і їх розмір для різних супутників, мають відмінності.

Оптико-електронні системи ДЗЗ проводять зйомку в оптичному діапазоні електромагнітних хвиль.



Рисунок 1.1 – Оптичний знімок

Панхроматичні зображення займають практично весь видимий діапазон електромагнітного спектра (0,45-0,90 мкм), тому є чорно-білими.

Мультиспектральні (багатозональні) знімальні системи формують кілька окремих зображень для широких спектральних зон в діапазоні від видимого до інфрачервоного електромагнітного випромінювання. Найбільший практичний інтерес зараз представляють мультиспектральні дані з космічних апаратів нового покоління, серед яких RapidEye (5 спектральних зон) і WorldView-2 (8 спектральних зон) [2].

Супутники нового покоління високої і надвисокої роздільної здатності, як правило, ведуть зйомку в панхроматичному і мультиспектральному режимах.

Гіперспектральні системи формують зображення одночасно для вузьких спектральних зон на всіх ділянках спектрального діапазону. Для гіперспектральної зйомки важлива не кількість спектральних зон (каналів), а ширина зони (чим менше, тим краще) і послідовність вимірювань. Так, знімальна система з 20-ма каналами буде гіперспектральною, якщо вона покриває діапазон 0,50-0,70 мкм, при цьому ширина кожної спектральної зони не більше 0,01 мкм, а знімальна система з 20-ма окремими

каналами, які покривають видиму область спектра ближню, короткохвильову, середню і довгохвильову інфрачервоні області, буде вважатися мультиспектральною.

Просторова роздільна здатність - величина, що характеризує розмір найменших об'єктів, помітних на зображенні. Факторами, що впливають на просторову роздільну здатність, є параметри оптико-електронної або радарної системи, а також висота орбіти, тобто відстань від супутника до об'єкту, що знімається. Найкраща просторова здатність досягається при зйомці в надир, при відхиленні від надира роздільна здатність погіршується. Космічні знімки можуть мати низьку (більше 10 м), середню (від 10 до 2,5 м), високу (від 2,5 до 1 м), і надвисоку (менше 1 м) роздільну здатність.

Радіометрична роздільна здатність визначається чутливістю сенсора до змін інтенсивності електромагнітного випромінювання. Визначається кількістю градацій значень кольору, відповідних переходу від яскравості абсолютно «чорного» до абсолютно «білого», і виражається в кількості біт на піксель зображення. Це означає, що в разі радіометричної роздільної здатності в 6 біт/піксель, ми маємо всього 64 градації кольору, 8 біт/піксель – 256 градацій, 11 біт/піксель – 2048 градацій.

1.1.2 Радіолокаційне зондування

Радіолокаційна (РЛ) зйомка (рис. 1.2) – вид аерокосмічної зйомки, здійснюваної радіолокатором – активним мікрохвильовим датчиком, здатним випромінювати та приймати розсіяні земною поверхнею поляризовані радіохвилі в певних діапазонах довжин хвиль (частот), виділених Регламентом радіозв'язку (табл. 1.1). Зворотний сигнал несе інформацію про фізичні та геометричні властивості поверхні, що зондується.

Радарна космічна зйомка виконується в ультракороткохвильовій (надвисокочастотній) області радіохвиль. Радіолокатор направляє промінь електромагнітних імпульсів на об'єкт. Частина імпульсів відбивається від об'єкта, і датчик вимірює характеристики відбитого сигналу і відстань до об'єкта. Всі сучасні космічні радарні системи (SAR) – це радіолокатори з синтезованою апертурою.

Радіолокатор випускає власний сигнал певної частоти і реєструє його (на відміну від оптичних сенсорів, що реєструють відбите сонячне випромінювання), а тому не залежить від освітленості. Радіохвилі сантиметрового діапазону проникають крізь хмари, тому радарні знімки не залежать і від хмарності.



Рисунок 1.2 – Радарний знімок

Таблиця 1.1 Діапазони довжин хвиль і частот для радіолокаційного зондування Землі

Позначення	Діапазон довжини хвилі, см	Діапазон частот, ГГц
Ka	0,75-1,18	0,75-1,18
K	1,19-1,67	1,19-1,67
Ku	1,67-2,4	18,0-12,5
X	2,4-3,8	12,5-8,0
C	3,9-7,5	8,0-4,0
S	7,5-15,0	4,0-2,0
L	15,0-30,0	2,0-1,0
P	30,0-100	1,0-0,3

Більшість радарних космічних систем працюють з довжинами хвиль від 0,5 до 75 см [3] у наведених нижче діапазонах.

Х-діапазон: від 2,4 до 3,75 см (від 12,5 до 8 ГГц). Дані цього діапазону широко використовуються для вирішення завдань військової розвідки і широкого ряду цивільних завдань, в тому числі для вивчення і класифікації льодовиків.

С-діапазон: від 3,75 до 7,5 см (від 8 до 4 ГГц). Дані цього діапазону знаходять найбільш широке застосування для вирішення великої кількості завдань в цивільному секторі, в тому числі для побудови цифрових моделей місцевості (ЦММ) і цифрових моделей рельєфу (ЦМР), моніторингу зсувів земної поверхні.

S-діапазон: від 7,5 до 15 см (від 4 до 2 ГГц). Діапазон цікавий для ряду військових і цивільних задач.

L-діапазон: від 15 до 30 см (від 2 до 1 ГГц). Просвічує рослинність, в тому числі не дуже щільний ліс. Випромінювання цього діапазону може частково (на глибину до декількох метрів) проникати в сухий сніг, лід, в сухий ґрунт.

P-діапазон: від 30 до 100 см (від 1 до 0,3 ГГц). Просвічує рослинність, в тому числі щільну, сухий ґрунт, сухий сніг, лід на глибину до декількох метрів. Використовуються для оцінки біомаси. Реалізовано тільки на авіа-носіях.

Проникаюча здатність радіолокаційних променів збільшується зі зростанням довжини хвилі. Радари з довжиною хвилі більше 2 см просвічують хмарність, але при цьому дощ і сніг є серйозними ускладнюючими факторами для радарних систем з довжинами хвиль до 4 см.

Інтерферометричне оброблення пар і серій знімків з метою визначення осідань земної поверхні є одним з унікальних і перспективних напрямків у використанні радарних знімків. Радарна інтерферометрія – метод вимірювань, що використовує ефект інтерференції електромагнітних хвиль. Техніка інтерферометричного оброблення радіолокаційних даних передбачає отримання декількох когерентних вимірів одного і того ж району земної поверхні зі зрушенням в просторі прийомної антени радіолокатора.

Дистанційне зондування Землі в радіохвильовому діапазоні має ряд принципових відмінностей від інших видів зйомки:

- при радіолокаційній зйомці використовуються хвилі набагато більшої довжини, ніж при зйомці в оптичному діапазоні; ці хвилі майже не поглинаються і не розсіюються хмарами, що дозволяє отримувати зображення земної поверхні і розташованих на ній об'єктів практично незалежно від метеорологічних умов;

- принцип активної зйомки дозволяє отримувати радіолокаційні знімки незалежно від сонячного освітлення, тобто радіолокатор є засобом цілодобового спостереження; особливо це властивість радіолокаційної зйомки важлива для отримання інформації про приполярні широти, де значну частину року спостерігається явище полярної ночі;

- отримані матеріали зйомки несуть інформацію про такі компоненти сигналу, як амплітуда і фаза; відмінності в амплітуді сигналу дозволяють розпізнавати об'єкти або їх властивості по радіолокаційним знімкам; фазова ж складова при особливих видах зйомки і подальшій обробці (радіолокаційна інтерферометрія) дозволяє отримувати інформацію про висоти поверхні або її зсувах, а також про швидкості руху об'єктів;

- при радіолокаційній зйомці використовується така властивість хвиль, як поляризація, яка визначається напрямком вектора напруженості електричного поля в площині, перпендикулярній напрямку поширення хвилі; зазвичай в РЛ зондуванні використовують лінійну поляризацію випромінюваного сигналу (горизонтальну - Г або вертикальну – В), а прийом зворотного сигналу можуть вести на узгоджених поляризаціях (в такому випадку прийняті скорочення ГГ і ВВ) або на перехресних (ГВ, ВГ); радіолокаційна зйомка може здійснюватися з різним набором поляризаційних каналів – з одним, двома або чотирма; останнім часом зустрічаються варіанти зйомки в компактно- і гібридно-поляризаційному режимах, коли при випромінюванні використовується лінійна поляризація з кутом орієнтації 45° або кругова (права чи ліва) поляризація відповідно, а приймається горизонтально і вертикально поляризований сиг-

нал; різнополяризованні хвилі по-різному взаємодіють з об'єктами місцевості, переважно в залежності від їх орієнтації щодо падаючої хвилі і внутрішньої структури; відзначається, що зворотний сигнал в узгоджених поляризаціях зазвичай вище, ніж в перехресних, а при відсутності спотворюючих факторів комбінації ВГ і ГВ однакові; приклад зображень, отриманих одночасно в різних поляризаціях, наведений на рисунку 1.3 [4];

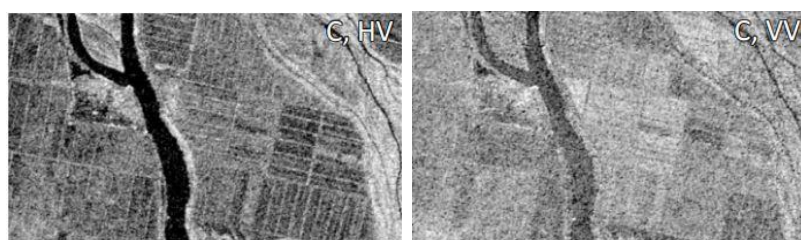


Рисунок 1.3 – Радіолокаційні зображення Radarsat-2 у різних поляризаціях: а – ВВ, б – ВГ

– на характер радіолокаційних зображень впливають властивості об'єктів, що зондуються, які не виявляються на знімках, отриманих в інших діапазонах електромагнітного спектра: гладкість поверхні і її діелектричні властивості; як правило, величина зворотного сигналу (і, відповідно, яскравість на РЛ зображенні) зростає при збільшенні розмірів нерівностей поверхні і відносної діелектричної проникності;

– в деяких випадках на радіолокаційних знімках виявляються підповерхневі об'єкти; як правило, проникаюча здатність сигналу зростає при збільшенні довжини хвилі;

– на відображення об'єктів на радіолокаційних знімках впливає їх орієнтація щодо напрямлення випромінювання, внутрішня структура цих об'єктів, які в сукупності призводять до формування різних механізмів розсіювання хвиль; при одноразовому розсіянні хвилі відбиваються дзеркально в сторону від радіолокатора, при об'ємному розсіянні відбувається багаторазове перевідбиття радіохвиль від частин об'єктів, внаслідок чого в сторону радіолокатора повертається деяка частина випромінювання; дворазове розсіювання утворюється в разі, коли хвиля відбивається двічі: від

вертикально і горизонтально орієнтованих об'єктів, в результаті чого значна частина випромінювання повертається в бік радіолокатора; як правило, найменшу яскравість на радіолокаційних знімках мають об'єкти, що характеризуються одноразовим розсіюванням, а найбільшу - дворазовим (рис. 1.4);

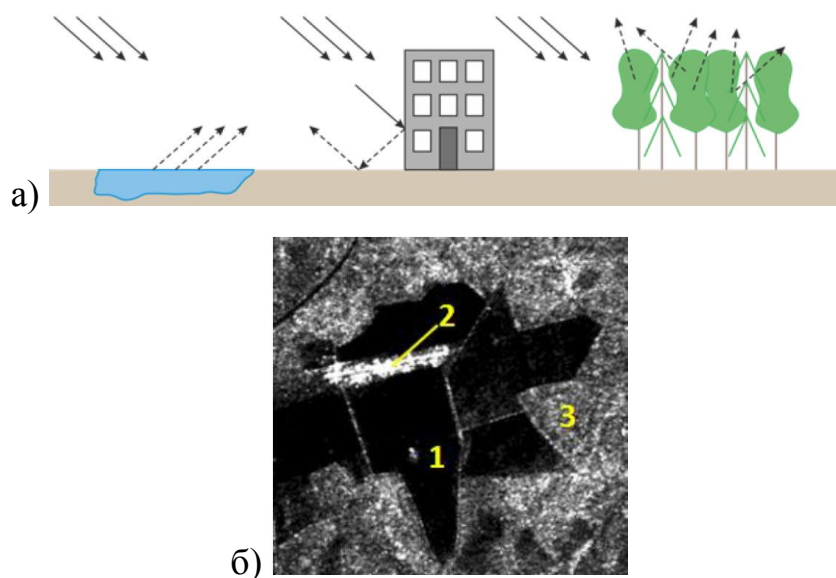


Рисунок 1.4 – Основні механізми розсіювання радіохвиль:

а – схематичне зображення; б – відображення на радіолокаційному знімку

– радіолокаційним зображенням притаманні специфічні радіометричні і геометричні особливості; випромінювання, що генерується радіолокаторами з синтезованою апертурою (РСА; в даний час космічна радіолокаційна зйомка здійснюється апаратурою саме цього виду), – когерентне, і після відбиття від земної поверхні когерентні хвилі інтерферують, що призводить до ослаблення або посилення амплітуди сигналу, що проявляється на зображенні як зернистість, що називається спекл-шум (рис. 1.4);

З одного боку, різноманітність параметрів сигналу, що фіксуються радіолокатором, велика кількість властивостей місцевості, що впливають на зворотний сигнал, специфіка самих зображень викликають деякі складності використання і сприйняття

радіолокаційних даних. З іншого боку, дані цього виду можуть надавати нову інформацію про місцевість, недоступну при використанні знімків в світловому діапазоні, що відкриває нові можливості для географічних досліджень і картографування.

Важливою тенденцією розвитку супутникових радарних систем, крім підвищення просторової роздільної здатності і збільшення числа режимів зйомки, є розширення поляризаційних можливостей, особливо, одночасна зйомка в чотирьох поляризаціях. Унікальна особливість повністю поляриметричних даних складається в можливості класифікації об'єктів на знімку з фізичного типу відображення.

1.2 Характеристика систем дистанційного зондування

1.2.1 Історія розвитку систем дистанційного зондування

Поняття дистанційного зондування з'явилося в XIX столітті після винаходження фотографії, а однією з перших областей, в яких стали застосовувати цей метод, стала астрономія. Згодом, дистанційне зондування почали використовувати у військовій області для збору інформації про супротивника і прийняття стратегічних рішень. Під час Громадянської війни в США фотознімки, отримані за допомогою некерованих літальних апаратів, використовували для спостереження за переміщенням військ, підвозом припасів, ходом фортифікаційних робіт і для оцінки ефекту артилерійських обстрілів. В результаті досліджень, які фінансувалися різними державами, були розроблені технології, що дозволили створити сенсори спочатку для військових цілей, а потім і для цивільного застосування цього методу. Після Другої світової війни метод дистанційного зондування стали використовувати для спостереження за навколишнім середовищем і оцінки розвитку територій, а також у цивільній картографії. У 60-х роках XX століття, з появою космічних ракет і супутників, дистанційне зондування вийшло в космос.

Нова ера дистанційного зондування пов'язана з пілотованими космічними польотами, розвідувальними, метеорологічними та ресурсними супутниками.

Можливості дистанційного зондування у військовій області значно зросли після 1960 року в результаті запуску розвідувальних супутників в рамках програм CORONA, ARGON, LANYARD, метою яких було отримання фотознімків з низьких орбіт. Незабаром були отримані стереопари знімків з роздільною здатністю 2 метри. Перші супутники працювали на орбіті від семи до восьми днів, але вже наступні покоління цих апаратів були здатні поставляти дані протягом декількох місяців.

В результаті здійснення програм пілотованих польотів, які були розпочаті в США в 1961 році, людина вперше стала на поверхню Місяця (1969 р). Особливої уваги заслуговують:

- програма Mercury, в рамках якої були отримані знімки Землі;
- систематичний збір даних дистанційного зондування під час проекту Gemini (1965-1966 рр.);
- програма Apollo (1968-1975 рр.), в ході якої велося дистанційне зондування земної поверхні і відбулася висадка людини на Місяць;
- запуск космічної станції Skylab (1973-1974 рр.), на якій проводились дослідження земних ресурсів, польоти космічних кораблів багаторазового використання, які почалися в 1981 році, а також отримання багатозональних знімків з роздільною здатністю 100 метрів у видимому і близькому інфрачервоному діапазоні з використанням дев'яти спектральних каналів.

У Радянському Союзі, а потім і в Росії космічні програми розвивалися паралельно до космічних програм США. Політ Юрія Гагаріна 12 квітня 1961 року, що став першим польотом людини в космос, запуски космічних кораблів «Восток» (1961-1963 рр.), «Схід» (1964-1965 рр.) і «Союз», робота на орбіті космічних станцій «Салют» (вперше 19 квітня 1971 року).

Перший метеорологічний супутник був запущений в США 1 квітня 1960 року. Він використовувався для прогнозу погоди, спостереження за переміщенням циклонів та інших подібних завдань. Першим серед супутників, які застосовувалися для регулярної зйомки великих ділянок земної поверхні, став TIROS-1 (Television and Infrared Observation Satellite).

Перший спеціалізований супутник був запущений в 1972 році. Він називався ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) і використовувався, в основному, для цілей сільського господарства. В даний час супутники цієї серії носять назву Landsat.

Вони призначені для регулярної багатозональної зйомки територій із середньою роздільною здатністю. Пізніше, в 1978 році, був запущений перший супутник зі скануючої системою SEASAT, але він передавав дані всього три місяці. Перший французький супутник серії SPOT, за допомогою якого можна було отримувати стереопари знімків, був виведений на орбіту в 1985 році. Запуск першого індійського супутника дистанційного зондування, названого IRS (Indian Remote Sensing), відбувся в 1988 році. Японія також вивела на орбіту свої супутники JERS MOS.

Починаючи з 1975 року, Китай періодично запускав власні супутники, але отримані ними дані до сих пір знаходяться в закритому доступі. Європейський космічний консорціум вивів на орбіту свої радарні супутники ERS в 1991 і 1995 роках, а Канада – супутник RADARSAT в 1995 році.

Історія розвитку аерокосмічних методів свідчить про те, що нові досягнення науки і техніки відразу ж використовуються для вдосконалення технологій отримання знімків. Так сталося в середині XX ст., коли такі нововведення, як комп'ютери, космічні апарати, радіоелектронні знімальні системи, зробили революційні перетворення в традиційних аерофотометодах – зародилося аерокосмічне зондування. Космічні знімки надали геоінформацію для вирішення проблем регіонального і глобального рівнів.

Аерокосмічний знімок - це двовимірне зображення реальних об'єктів, яке отримано за певними геометричним і радіометричним (фотометричним) законам шляхом дистанційної реєстрації яскравості об'єктів і призначене для дослідження видимих і прихованих об'єктів, явищ і процесів навколишнього світу, а також для визначення їх просторового положення.

Діапазон масштабів сучасних аерокосмічних знімків величезний: він може змінюватися від 1: 1000 до 1: 100 000 000, тобто в сто тисяч разів. При цьому найбільш поширені масштаби аерофотознімків лежать в межах 1:10 000 - 1:50 000, а космічних

– 1: 200 000 - 1:10 000 000. Всі аерокосмічні знімки прийнято ділити на аналогові (зазвичай фотографічні) і цифрові (електронні). Зображення цифрових знімків утворено з окремих однакових елементів - пікселів (від англ. Picture element-pixel); яскравість кожного пікселя характеризується одним числом.

Аерокосмічні знімки як інформаційні моделі місцевості характеризуються рядом властивостей, серед яких виділяють образотворчі, радіометричні (фотометричні) і геометричні. Образотворчі властивості характеризують здатність знімків відтворювати дрібні деталі, кольори та звуки градації об'єктів, радіометричні свідчать про точність кількісної реєстрації знімком яскравості об'єктів, геометричні характеризують можливість визначення по знімках розмірів, довжин і площ об'єктів і їх взаємного положення.

Оптимальний спосіб використання даних спостереження поверхні Землі зі супутників полягає в тому, щоб аналізувати їх спільно з інформацією з інших джерел.

Отримання знімків з перекриттям з декількох послідовних точок орбіти (стереозйомки) дозволяє отримати більш точне уявлення про тривимірні об'єкти і підвищити відношення сигнал / шум.

Використання багатозональних знімків засноване на унікальності тонових характеристик різних об'єктів. Об'єднання яскравості даних зі знімків в різних спектральних діапазонах дозволяє безпомилково виділяти певні просторові структури. Знімки за допомогою великого числа (більше 10) вузьких знімальних зон називають гіперспектральними. При гіперспектральній зйомці збільшується можливість виділення об'єктів, що характеризуються наявністю смуг поглинання, що характерно, наприклад, для забруднень. Багатозональна і гіперспектральна зйомки дозволяють більш ефективно використовувати відмінності в спектральній яскравості об'єктів зйомки для їх дешифрування.

До цього виду знімків можна віднести також радіолокаційні знімки, що отримують як при реєстрації відбитих радіохвиль різної довжини, так і при різній їх поляризації.

Багаточасова зйомка - це планова зйомка в заздалегідь визначені дати, яка дозволяє виконувати порівняльний аналіз знімків тих об'єктів, характеристики яких змінюються в часі.

Багаторівнева зйомка - зйомка з різними рівнями дискретизації використовується для отримання більш докладної інформації про досліджувану територію.

Як правило, весь процес збору даних підрозділяють на три рівні: космічна зйомка, аерозйомка і наземні дослідження.

Знімки, отримані методом багатополяризованої зйомки, використовують для проведення кордонів між об'єктами на основі відмінностей в поляризаційних властивостях відбитого випромінювання. Так, наприклад, відбите випромінювання від водної поверхні зазвичай більш сильно поляризоване, ніж відбите випромінювання від рослинного покриву.

Комбінований метод полягає в використанні багаточасової, багатозональної і багатополяризованої зйомок.

Історія створення та існування космічних РСА наочно показана на рисунку 1.5, а розвитку їх характеристик - в таблиці 1.2. Відзначимо, що крім наведених в них космічних систем з РСА різними країнами експлуатувалися в минулому і в даний час системи військового призначення (Lacrosse (США), SAR-Lupe (Німеччина), TecSAR (Ізраїль) та ін.), Однак з огляду на те, що відомості про ці системи обмежені, а отримувані ними дані недоступні рядовим користувачам, зупинятися детально на них не будемо.

1.2.2 Супутники, дані яких використовуються в магістерській дисертації

LANDSAT-8. 11 лютого 2013 був здійснений запуск нового КА Landsat-8 (проект LDCM - Landsat Data Continuity Mission). Супутник продовжить поповнення банку зображень, отриманих за допомогою супутників серії Landsat протягом вже 40 років і охоплюють всю поверхню Землі. На КА Landsat-8 встановлені два сенсори:

оптико-електронний (Operational Land Imager, OLI) і тепловий (Thermal InfraRed Sensor, TIRS).

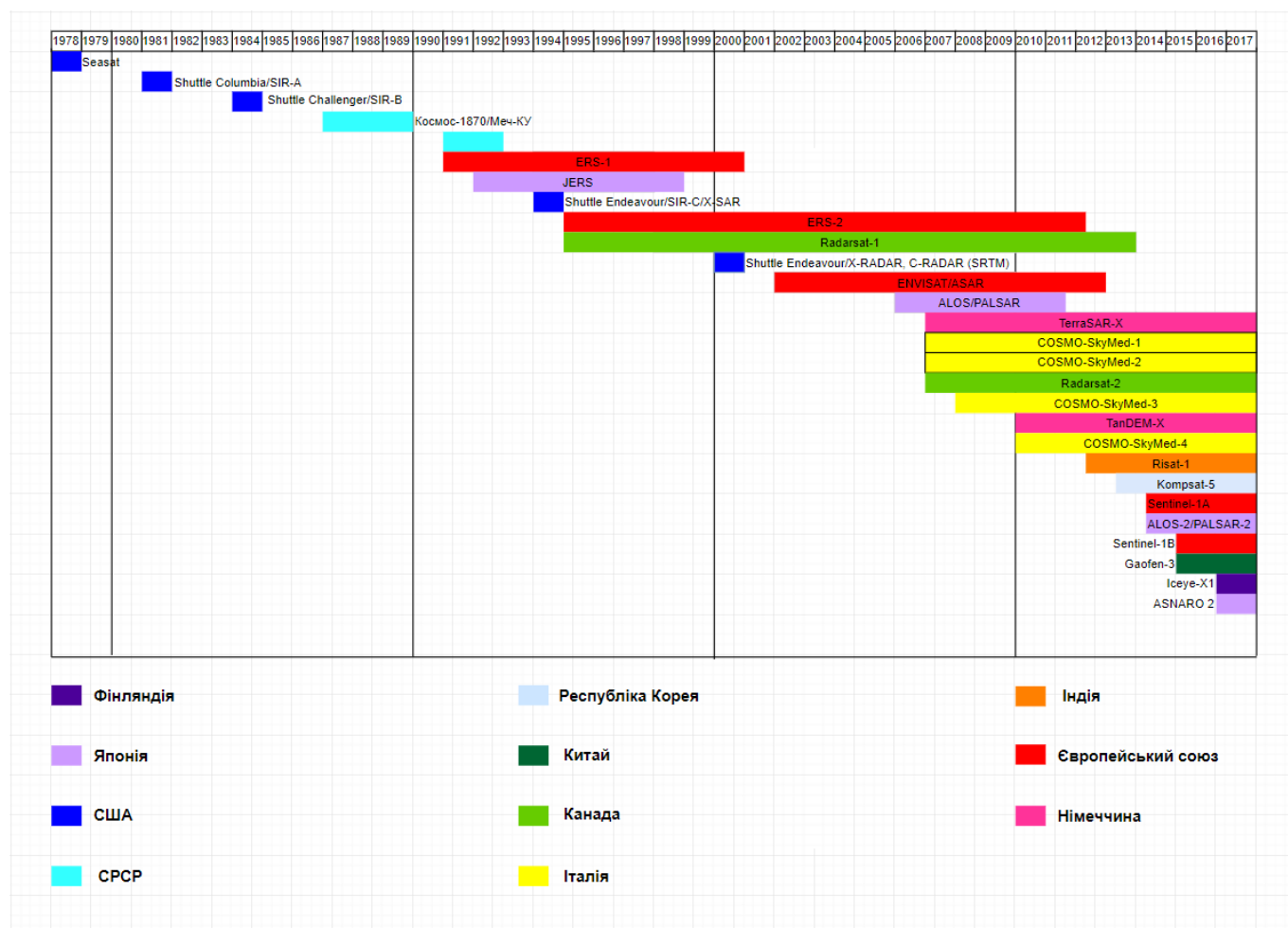


Рисунок 1.5 – Терміни існування космічних апаратів з радарними системами з 1978 рік по 2018 рік

Європейське космічне агентство. У 1998 р для забезпечення всеосяжного моніторингу навколишнього середовища керівними органами Європейського Союзу було прийнято рішення про розгортання програми GMES (Global Monitoring for Environment and Security), яка повинна здійснюватися під егідою Єврокомісії в партнерстві з Європейським космічним агентством (European Space Agency, ESA) і європейським агентством з навколишнього середовища (European Environment Agency, EEA). Будучи на сьогоднішній день найбільш масштабною програмою спостере-

ження Землі, GMES забезпечує державні органи та інших користувачів високоточною, сучасною і доступною інформацією для поліпшення контролю змін навколишнього середовища, розуміння причин зміни клімату, забезпечення безпеки життя людей і інших задач.

GMES складається з комплексу систем спостереження: супутників ДЗЗ, наземних станцій, морських суден, атмосферних зондів і т. д.

Космічний компонент GMES спирається на два типи систем ДЗЗ: супутники Sentinel, спеціально призначені для програми GMES (їх оператором буде ESA), і національні (або міжнародні) супутникові системи ДЗЗ, включені в так звані місії сприяння GMES (GMES Contributing Missions; GCMs).

Запуск супутників Sentinel почався з 2013 р Вони ведуть зйомку з використанням різних технологій, наприклад, за допомогою радарів і оптико-електронних мультиспектральних сенсорів.

Для реалізації програми GMES під загальним керівництвом ESA проводилася розробка п'яти типів супутників ДЗЗ Sentinel, кожен з яких здійснює певну місію, пов'язану з моніторингом Землі. Кожна місія Sentinel включає в себе угруповання з двох супутників для забезпечення найкращого охоплення території і прискорення повторних зйомок, що служить підвищенню надійності і повноти даних для GMES.

Місія Sentinel-1 це угруповання з двох радарних супутників на полярній орбіті, оснащених радаром з синтезованою апертурою (SAR) для зйомок в С-діапазоні. Зйомка радарних супутників Sentinel-1 не залежить від погоди і часу доби. Угруповання Sentinel-1, забезпечує зйомками всю територію Європи, Канади, а також основні морські судноплавні шляхи кожні 1-3 дні, незалежно від погодних умов. Радарні дані поставляються протягом години після проведення зйомки – це великий крок вперед в порівнянні з існуючими радарними супутниковими системами.

Пара супутників Sentinel-2 буде регулярно поставляти космічні знімки високої роздільної здатності на всю Землю, забезпечуючи безперервність отримання даних з характеристиками аналогічними програмами SPOT і Landsat.

Sentinel-2 оснащений оптико-електронним мультиспектральним сенсором для зйомок з роздільною здатністю від 10 до 60 м у видимій, ближній інфрачервоній (VNIR) і короткохвильовій інфрачервоній (SWIR) зонах спектра, що включають в себе 13 спектральних каналів. Це гарантує відображення відмінностей в стані рослинності, в тому числі і тимчасові зміни, а також зводить до мінімуму вплив на якість зйомки атмосферних явищ.

Орбіта висотою в середньому 785 км, наявність в місії двох супутників, дозволяє проводити повторні зйомки кожні 5 днів на екваторі і кожні 2-3 дні в середніх широтах.

Збільшення ширини смуги огляду поряд з високою повторюваністю зйомок дозволяє відстежувати швидко змінювані процеси, наприклад, зміна характеру рослинності протягом вегетаційного періоду.

Унікальність місії Sentinel-2 пов'язана з поєднанням великого територіального охоплення, частих повторних зйомок, і, як наслідок, систематичним отриманням повного покриття всієї Землі мультиспектральною зйомкою з високою роздільною здатністю.

1.2.3 Тенденції розвитку систем дистанційного зондування

Револьюційний розвиток комп'ютерних, космічних, інформаційних технологій в кінці XX – початку XXI ст. привели до якісних змін в галузі дистанційного зондування Землі: з'явилися космічні апарати зі знімальними системами нового покоління, що дозволяють отримувати знімки з надвисокою просторовою роздільною здатністю (до 41 см у супутника GeoEye-1). Зйомки ведуться в гіперспектральних і багатоканальному мультиспектральному (в даний час до 8 каналів у супутника WorldView-2) режимах. Основними тенденціями останніх років є поява нових супутників надвисокої роздільної здатності з поліпшеними характеристиками (французька система Pleiades), розробка концепції оперативної і глобальної зйомки земної поверхні з ви-

сокою роздільною здатністю за допомогою угруповань малих супутників (угруповання німецьких супутників RapidEye, поповнення угруповання DMC супутником з високою роздільною здатністю, перспективні супутники SkySat, NovaSAR і т. д.) [6]. У технологіях ДЗЗ крім традиційних напрямків (поліпшення просторового дозволу, додавання нових спектральних каналів, автоматизація процесів обробки і оперативного надання даних) з'являються розробки, пов'язані з оперативною відеозйомкою об'єктів з космосу (наприклад, розробки компанії SkyBox Imaging, США).

В майбутньому планується продовження деяких космічних програм радіолокаційного спостереження Землі (Radarsat, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed), для чого розробляються РСА нового покоління, очікується поява космічних систем, що працюють в частотних діапазонах, що не використовувалися раніше. Передбачається створення угруповань однотипних КА з метою підвищення періодичності зйомки, а також оптико-радіолокаційних угруповань.

На найближчі 5-10 років різними країнами заплановані запуски цілого ряду КА з РСА, які будуть здійснювати зйомку в різних діапазонах довжин хвиль (таблиця 1.2) [7].

Таблиця 1.2 - Перспективні КА с РСА

Космічний апарат	Країна	Запланований рік запуску	Діапазон довжини хвилі
PAZ	Іспанія	2018	X
Iceye (до 50 КА)*	Фінляндія	2018	X
Radarsat Constellation Mission (3 КА)	Канада	2018	C
SAOCOM 1A, 1B, -CS	Аргентина	2018	L
NOVASAR-S	Великобританія	2018	S
TerraSAR-X Next Generation	Німеччина	2018	X
COSMO-SkyMed Second Generation	Італія	2018, 2019	X
Кондор-ФКА (2 КА)	Росія	2019, 2020	S

OptiSAR	Канада	2019, 2020	X, L
KOMPSAT-6	Республіка Корея	2020	X
Biomass	ЕС	2021	P
NISAR	США, Індія	2021	S, L
GaoJing (Superview) (4 КА)	Китай	До 2022	X
TanDEM-L	Німеччина	2022	L
Обзор-Р (3 КА)	Росія	2021, 2023, 2024	X

Розвиток засобів дистанційного зондування Землі йде наростаючим темпами. Щорічно на орбіту виводяться два-три десятка супутників ДЗЗ і метеоспостережень. На діаграмі (рис. 1.6) представлена статистика запусків по роках космічних апаратів з оптико-електронною апаратурою надвисокої (менше 1 м), високої (від 1 до 10 м) і середньої (10-250 м) роздільної здатності.

У цій статистиці не враховуються запуски наносупутників Dove і Flock з оптико-електронною апаратурою високого дозволу. Видно, що домінуючими системами оптико-електронного спостереження стали системи високого і навіть високої роздільної здатності. За останні роки на орбіту виведені десятки космічних апаратів з такою апаратурою

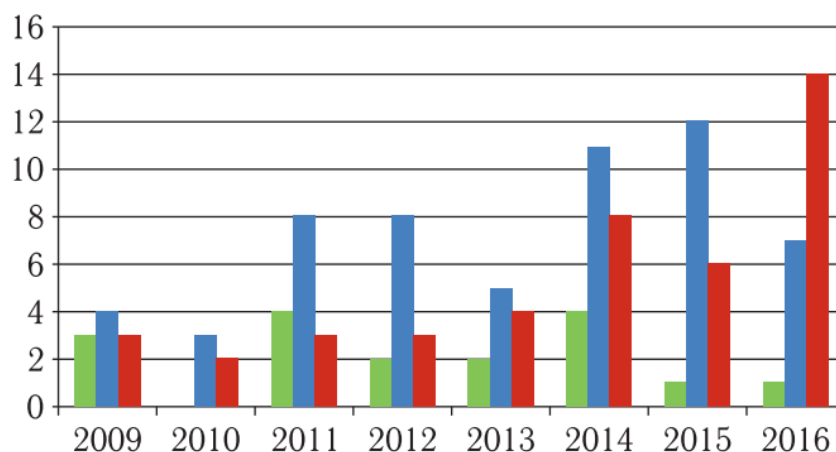


Рисунок 1.6 – Статистика запусків по роках космічних апаратів з оптико-електронною апаратурою надвисокої, високої і середньої роздільної здатності

Аналіз показує, що найбільш загальною тенденцією є прагнення до підвищення роздільної здатності оптико-електронної апаратури супутників ДЗЗ. Це постійний домінуючий лейтмотив розвитку космічних оптикоелектронних систем спостереження, який знайшов відображення практично у всіх класах вирішуваних завдань дистанційного зондування: природокористуванні, картографії, у вирішенні задач сільського та лісового господарства, попередженні та контролі надзвичайних ситуацій і т. п. Так само багато практичних підходів, пов'язані зі зміною схем спостереження, висотою орбіти, конструктивних параметрів апаратури, її габаритів, а також габаритів супутникових платформ, в першу чергу направлені на підвищення роздільної здатності. Це можна простежити за хронологією появи нових генерацій супутників високої і надвисокої роздільної здатності як в окремих угрупованнях і країнах, так і в цілому. Візьмемо лише кілька прикладів. Перший комерційний космічний апарат ДЗЗ Ikonos-2 (1999 р компанія Space Imaging) мав просторову роздільну здатність (проекцію пікселя на Землю) - 0,81 м, а КА GeoEye-1 (2008 г.), створений за замовленням однойменної компанії, що стала спадкоємицею SpaceImaging, має роздільну здатність 0,41 м. У наявності вдвічі покращує роздільну здатність. Конкурент Space Imaging - компанія DigitalGlobe стартувала в 2001 р зі супутником QuickBird-2 з роздільною здатністю 0,61 м. У 2007 р на орбіту був виведений КА WorldView-1 (роздільна здатність 0,45 м), в 2008 р - КА WorldView -2 (0,45 м), а в 2014 і 2016 pp. - КА WorldView-3 і WorldView-4 з роздільною здатністю вже 0,31 м. Треба відзначити, що супутники GeoEye-1 і WorldView-1, -2, -3, -4 створювалися після видачі урядом США ліцензії на комерційні КА з роздільною здатністю до 0,25 м, і їх апаратура потенційно може реалізувати ці характеристики на більш низьких орбітах [8] . Однак з комерційної точки зору потрібно не тільки висока роздільна здатність, але і велика смуга охоплення. Тому оператор космічної системи DigitalGlobe вирішив використовувати свої супутники нового покоління на орбітах, які дозволяють здійснювати зйомку з роздільною

здатністю 31-35 см. З технічної точки зору підвищення роздільної здатності реалізується або через збільшення діаметра і фокусної відстані використовуваної оптичної системи, або через зменшення розміру пікселів фотоприйомних матриць, використовуваних в апаратурі, або просто за рахунок зменшення висоти робочої орбіти. На практиці використовуються всі три способи, причому іноді одночасно. З самого початку ери комерційних систем ДЗЗ були закладені два підходи до використовуваних орбітах спостереження. Перший підхід орієнтований на створення найбільш «складних» і повнофункціональних супутників, призначених для роботи на орбітах 700-800 км і, як правило, мають великогабаритну оптичну систему. Такі супутники за рахунок великої висоти орбіти мають широку смугу огляду і гарну оперативність спостереження об'єктів на поверхні Землі. Другий підхід спочатку орієнтувався на використання менш габаритних оптичних систем і самих супутників і при меншій смузі огляду і оперативності забезпечував досягнення приблизно тих же параметрів по вирішенню з кругових орбіт меншої висоти.

Збільшення просторової роздільної здатності і смуги захоплення, як правило, веде до істотного зростання кількості інформації, що передається на наземні приймальні пункти, і тісно пов'язане з інформаційною продуктивністю оптико-електронної апаратури. Це є ще однією домінантою, характерною для комерційних систем ДЗЗ високої роздільної здатності. При цьому слід виділяти як інформаційну продуктивність самої знімальної апаратури, так і швидкість і обсяг переданої цифрової інформації на приймальні станції, а також продуктивність космічних систем спостереження в цілому. Традиційно продуктивність визначається як площа земної поверхні, що знімається і передається на приймальні станції за одну добу. інформаційна продуктивність в першу чергу залежить від технічних характеристик оптико-електронної апаратури і службових систем супутника. До вже згадуваних довжини рядка фотоприймача детектора і смуги захоплення в першу чергу слід додати обсяг бортового пристрою, що запам'ятовує і швидкість скидання інформації через радіолінію. При цьому визначальним фактором може бути не тільки можливості бортової апаратури і самого

супутника, а й можливості мережі наземних станцій, що забезпечують як прийом інформації ДЗЗ, так і управління супутником (або угрупованням супутників) і апаратурою, встановленої на ньому. Обсяг бортової пам'яті оптико-електронних супутників, використовуваної для зберігання знімків високої і надвисокої роздільної здатності, безперервно зростає від покоління до покоління. На першому поколінні супутників, до яких слід віднести IKONOS-2 і QuickBird-2, обсяг бортовий пам'яті був відносно невеликим і становив 64 і 128 Гбіт відповідно. При цьому передача даних на приймальні станції виконувалася по радіоканалу з пропускнуою спроможністю 320 Мбіт / с. Це забезпечувало зйомку до 64-100 сцен на витку до заповнення пам'яті. Обсяг бортової пам'яті космічних апаратів нового покоління збільшився більш ніж на порядок. Для порівняння: на GeoEye-1 він становив 1000 Гбіт, WorldView-1, -2, -3 - 2199 Гбіт, а WorldView-4 - вже 3200 Гбіт. Відповідно потрібно було збільшити швидкість передачі даних через бортову радіолінію до 740 (GeoEye-1), 800 (WorldView-1, -2, -4) і 1200 Мбіт / с (WorldView-3). Аналогічну еволюцію в розвитку зазнають і космічні системи інших країн. При цьому слід відзначити, що радіолінії передачі інформації «Космос-Земля» в Х-діапазоні вже вийшли практично на максимальні швидкості, і в нових поколіннях систем активно розглядається використання інших діапазонів частот, а також досліджуються (В тому числі і експериментально) можливості передачі даних на наземні пункти по оптичним каналах.

В останні роки стрімко набирає популярність використання космічної бортової апаратури [9], що забезпечує відеозйомку з високою просторовою роздільною здатністю. зараз у всіх на слуху супутники SkySat компанії Planet, забезпечують панхроматичну відеозйомку майданчиків $2,0 \times 1,1 \text{ км}^2$ з роздільною здатністю 1,1 м. Фотоприймальний тракт супутників SkySat реалізований на кадрових КМОП-матрицях. Зчитування інформації відбувається з високою частотою кадрів, тому реалізація режиму відеоспостереження є природним технічним рішенням, що впливають з архітектури апаратури. Для отримання панхроматичних відеороликів супутник наводиться на об'єкт, що цікавить і утримує його на своїй лінії візування. При цьому рух зображення в

фокальній площині на осі візування практично зупиняється. Некомпенсованими залишаються тільки похибки, пов'язані з точністю систем стабілізації систем управління рухом. Апаратура SkySat забезпечує отримання 90 секундних відеороликів в форматі HD 1920×1080 з частотою кадрів 30 Гц. Формат представлення даних MP4. За проханням замовника можуть представлятися дані в розширеному форматі 2560×1080 пікселів. Однак компанія Planet з її супутниками SkySat не є піонером в цьому напрямку космічних систем спостереження. У далекому 1994 р німецька DLR у співпраці з Берлінським технічним університетом створила супутник Tubsat-B, який був виведений на орбіту спільно із супутником «Метеор-3». проект носив в основному навчальний характер. Супутник був оснащений відеокамерою на основі матриці APS форматом всього 384×288 пікселів і мав роздільну здатність 23×30 м. Це був перший досвід, і КА пропрацював на орбіті тільки 39 днів. Ідея отримала продовження в мікросупутників DLR-Tubsat (1999), який мав у своєму складі вже три відеокамери з роздільною здатністю 375, 120 і 6 м. Камери були створені на основі кадрових матриць ПЗС форматом 750×580 пікселів розміром 8×8 мкм і відрізнялися тільки характеристиками використаних об'єтивів. Фокусна відстань камери з максимальною роздільною здатністю становила 1000 мм, що забезпечило поле зору відеокадруа $6 \times 4,6$ км при роздільній здатності 6 м. Дані безпосередньо передавалися на Землю в аналоговому вигляді в стандарті PAL.

В даний час дані відеозйомки використовуються для контролю транспортного трафіку як на суші, так і на морських і річкових комунікаціях, в портах і на рейдах, моніторингу роботи промислових об'єктів, будівництва, розробки корисних копалин відкритим способом, моніторингу надзвичайних ситуацій тощо. Слід очікувати появи спеціалізованих додатків і програмних засобів для вирішення специфічних завдань, заснованих на отриманих космічних відеоданих в режимі, близькому до реального. Однак казати про справжній безперервний відеомоніторинг можна буде тільки при розгортанні дуже великих супутникових угруповань, які, змінюючи один одного, за-

безпечать постійне спостереження об'єктів (або квазіпостійне), а не епізодичне по півтори-дві хвилини, як в даний час. Хоча, хмарність та темний час доби будуть вносити в цей процес суттєві корективи.

На рисунку 1.7 [10] схематично представлений напрямок розвитку оптико-електронних систем ДЗЗ високої та надвисокої роздільної здатності

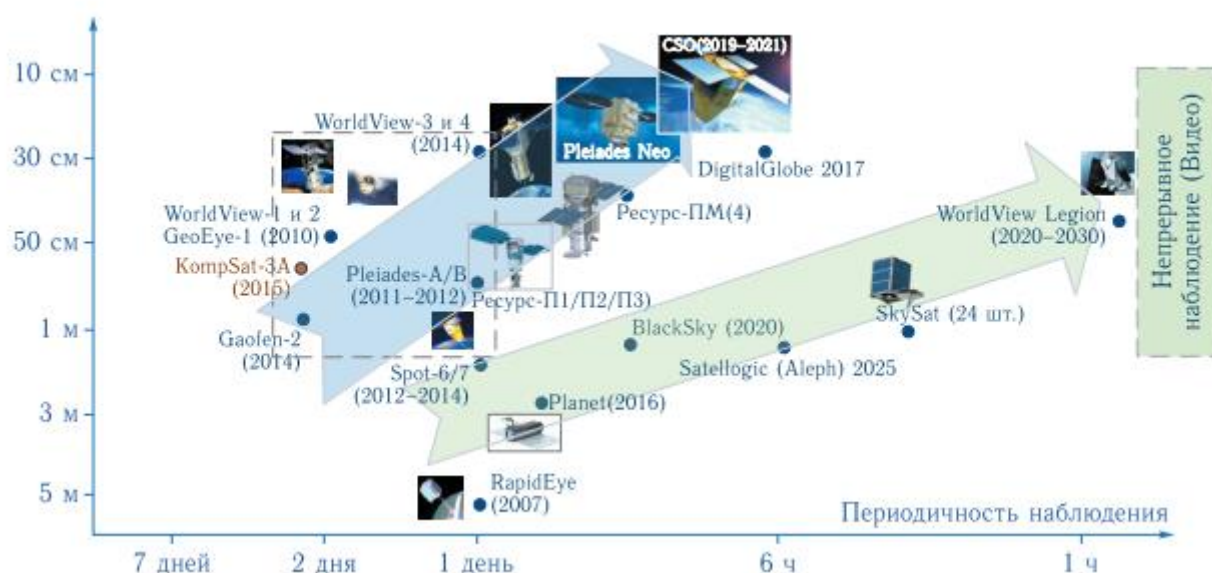


Рисунок 1.7 – Тенденції розвитку оптико-електронних систем ДЗЗ

По горизонталі відкладено оперативність спостереження, а по вертикалі - просторову роздільну здатність.

Видно, що при підвищенні роздільної здатності нові покоління супутників і угруповань на їх основі прагнуть досягти все більш частого оновлення інформації, аж до безперервного відеоспостереження. Технічні передумови, а також випробувані для цього рішення, вже є.

Як видно, тренд «великих» супутників націлівся на граничні для космічної зйомки значення роздільної здатності близько 10 см, а тренд мінісупутників в основному поки прагне до роздільної здатності 0,3-0,5 м. Можна припустити, що такі відмінності у розмірах оптичних систем, збережуться і надалі. Більш того, розробка легких (в тому числі і складових) великогабаритних конструкцій космічних телескопів (подібних JWST) може відкрити друге дихання в ДЗЗ, перенести супутники спостереження

на дуже високі і навіть на геостаціонарні орбіти, щоб забезпечити сталість моніторингу на всій планеті.

Ще рано говорити про занепад епохи «великих» супутників. Як мінімум років 5-8 продовжуватимуть створюватися і розгортатися угруповання таких супутників. Більше 10-15 років буде тривати їх експлуатація. Ну а далі час сам розставить пріоритети. Швидше за все, до «великих» супутників прийдуть ті ж проривні рішення, що дозволили створювати оптичні мікро- і мінісупутники з дуже високими характеристиками. Це також полегшить і здешевить їх, зберігши (або навіть примноживши) їх основні переваги - граничні в усіх напрямках характеристики. Можна припустити, що на новому витку спіралі буде вироблено ще багато космічних систем для створення все нових і нових продуктів і послуг, які стануть на службу всьому населенню планети.

1.3 Проблеми оброблення супутникових знімків

Процес склеювання зображень ускладнюють наступні ситуації:

- наявність різних типів об'єктів на зображеннях;
- наявність зсувів на супутникових знімках за різні дати та з різними сенсорами;
- різні погодні умови під час зйомки;
- погані погодні умови;
- часткове перекриття зображення;
- часткове попадання об'єктів у кадри;
- зображення об'єкту під різними кутами з різної відстані.

Дані дистанційного зондування містять цілий ряд випадкових, системних і систематичних спотворень, пов'язаних із впливом атмосфери, кривизни Землі та руху знімального апарату щодо її поверхні в момент зйомки, фізичними характеристиками

використовуваних датчиків і каналів зв'язку. Для усунення згаданих, досить численних спотворень, з урахуванням їх специфіки, використовується корекція декількох видів: атмосферна, радіометрична, геометрична і калібрування.

Для різних типів космічних знімків існують різні комбінації причин спотворень. Розглянемо причини спотворення наведені нижче.

Кривизна поверхні Землі. Геометричні спотворення знімків, викликані кривизною поверхні Землі виходять в результаті того, що точки місцевості, що сканується, не лежать в одній площині і спостереження ведеться не в надирі, а під кутом до поверхні землі. Тому при віддаленні від центральної лінії сканування (де зйомка ведеться в надирі) спотворення форми і розміру об'єктів збільшується.

Спотворення форми об'єктів. Пряма лінія на місцевості буде кривою на знімку, квадрат прямокутником і т.д. Цим типом спотворення можна знехтувати, якщо кут огляду сканера невеликий (MSS - Landsat, кут огляду приблизно 5,8).

Спотворення масштабу. Для знімків зроблених оптико-механічним сканером (MODIS, AVHRR, ETM і MSS - Landsat, Aster (TIR)) – масштаб при видаленні від центральної лінії знімка стає меншим. Тобто, якщо взяти два пікселя знімка: один з центральної області знімка, а другий з бічної, то піксель з бічної області буде містити велику площу Землі, хоча розмір їх однаковий.

Для знімків (супутники SPOT, IRS, Ikonos, датчик Aster (VNIR, SVIR) масштаб при видаленні від центральної лінії знімка не змінюється [11].

Нерівності рельєфу. Нерівності рельєфу викликають ті ж спотворення, що і кривизна поверхні землі, але завдання з їх усунення складніше, через те, що форми рельєфу складніші, ніж форма Землі, яка близька до сфери.

Оскільки космічні знімки роблять з великої висоти, то вплив форм рельєфу незначний, тому даний тип спотворень враховують лише для гірських областей.

Обертання Землі. Сканування Землі з космосу відбувається не миттєво, як фотозйомка, тому обертання Землі (за 1 хв Земля повертається на 0.25°) викликає зміну умов зйомки в процесі сканування однієї сцени.

Рух космічного апарату в процесі формування зображення. На якість і властивості знімків впливає форма і висота орбіти супутника. Наприклад, кругова орбіта забезпечує однакову висоту зйомки земної поверхні, а отже, для однієї і тієї ж апаратури - однаковий охоплення і розширення знімків. Геометричні спотворення підрозділяються на спотворення, пов'язані з внутрішніми недоліками геометрії сенсора, і на спотворення, обумовлені зовнішніми факторами (умови роботи сенсора, форма об'єктів і ін.).

Той факт, що радіолокаційна зйомка проводиться виключно при бічному огляді (не в надир), обумовлює наявність геометричних спотворень, що поєднуються одночасно з яскравістю (ці спотворення спостерігаються на ділянках з розчленованим рельєфом, при наявності і високих вертикальних об'єктів, наприклад, багатопверхових будівель): розтягування і стиснення зображення схилів, що супроводжується підвищенням яскравості схилів, звернених в сторону радіолокатора, і її зниженням у протилежне (прийнята в англійській літературі назва - foreshortening), перенакладання (layover) і радіолокаційна тінь (radar shadow). Схеми виникнення спотворень, приклади радіолокаційних зображень, що ілюструють ці види спотворень, і відповідні обраним ділянкам знімки в оптичному діапазоні наведені на рисунку 1.8.

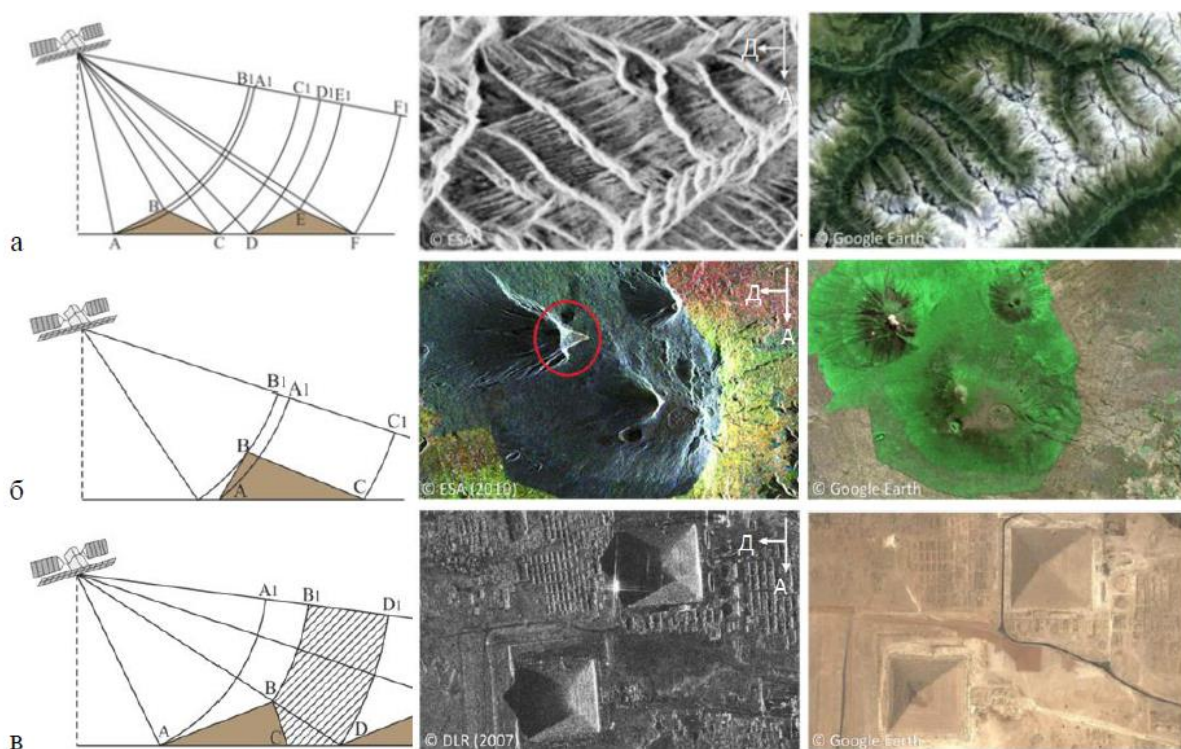


Рисунок 1.8 – Основні види геометричних спотворень радіолокаційних знімків: а – розтягування схилів, б – перенакладання, в – радіолокаційна тінь. Зліва наведені схеми формування спотворень, в центрі – прагменти радіолокаційних знімків, справа – фрагменти знімків у видимому діапазоні

1.4 Вимоги до супутникових знімків

Розглянемо особливості космічної зйомки та вимоги до ДДЗ на прикладі застосування супутникових знімків у сільськогосподарському виробництві [12].

Більшість нагальних проблем, з якими стикається людство сьогодні, прямо чи опосередковано пов'язані з сільськогосподарським виробництвом. Враховуючи прогнозований приріст населення та зміни в харчуванні в багатьох регіонах світу, що найбільш швидко зростають, сільськогосподарське виробництво потребує збільшення та вдосконалення для забезпечення глобальної безпеки продуктів харчування та харчування. Концепція стійкої інтенсифікації описує шляхи досягнення цієї мети, враховуючи при цьому земні ресурси та глобальну систему клімату. У цьому контексті дистанційне зондування для моніторингу використання сільськогосподарських земель та управління відіграє ключову роль.

З точки зору дистанційного зондування, сільське господарство - це складне явище, яке створює унікальні проблеми. Наприклад, тип культури, який вирощується на полі, зазвичай змінюється протягом та між роками відповідно до обраної сівоzmіни. Один і той же тип культури може мати різний часовий та спектральний вигляд через місцевий землеустрій, особливості генотипу, умови ділянки чи інші фактори зовнішнього середовища. Окремі поля різняться за розмірами в різних регіонах, головним чином, завдяки історичній практиці надання земель та правонаступництва, іноді також через новітні суспільні підходи до власності на землю (наприклад, кооперативи у Східній Європі). Вони часто вимагають зображень з високою роздільною здатністю (10–30 м). Тимчасова інформація, як правило, є ключовою для диференціації окремих

типів сільськогосподарських культур, використовуючи унікальні відмінності в сезонних характеристиках вирощування та фенології врожаю. Однак детальна спектральна інформація може допомогти розрізнити досить тонкі відмінності між морфологічно подібними типами сільськогосподарських культур, такими як деякі зернові.

Спостережний характер оптичних супутникових даних дистанційного зондування не завжди безпосередньо відповідає таким вимогам. По-перше, незважаючи на фіксований орбітальний цикл повторень, спостереження дистанційного зондування часто сильно нерегулярні в часі та просторі. Це відбувається тому, що ефективна частота спостереження залежить від умов ясного неба, а також інших факторів, пов'язаних з місією (наприклад, графіки придбання, потужність низхідної лінії зв'язку тощо). Необхідну внутрішньорічну частоту спостереження, для розчленування різних фенологій сільськогосподарських культур, нелегко здобути в багатьох регіонів, де часто спостерігається хмарне покриття. Це посилюється, коли метою є національні, регіональні чи навіть глобальні оцінки типу чи стану сільськогосподарських культур, оскільки для цього потрібно інтегрувати та аналізувати декілька орбітальних зображень. Датчики грубої роздільної здатності (> 100 м) забезпечують часті часові спостереження, але не мають просторових деталей, необхідних для вирішення окремих полів у багатьох частинах світу, але можуть добре працювати, якщо розміри поля такі великі, як, наприклад, в агропромислових ландшафтах Бразилії. Датчики високої роздільної здатності отримують дані набагато рідше і часто додатково не мають спектральних смуг у вирішальних областях довжини хвилі, таких як короткохвильовий інфрачервоний або червоний край. Хоча основна увага приділяється використанню даних оптичного дистанційного зондування, слід зазначити, що дані РЛС синтетичної діафрагми (SAR) успішно використовуються для картографування типів сільськогосподарських культур. Потенціал візуалізації за погоди SAR являє собою ключову перевагу перед оптичними знімками, а висока темпоральна частота повторень, запропонована SAR Sentinel-1, значно покращила зручність використання методів картографування та моніторингу. Підходи, що використовують комбінації SAR та оптичних

даних, існують, орієнтуючись на синтез різних даних сенсорів або використовуючи обидва сенсорні спостереження як незалежні прогнозні функції.

Ключові програми для картографування та моніторингу сільського господарства включають тип сільськогосподарських культур, управління посівами, розвиток сільськогосподарських культур та здоров'я, прогнозування врожаю, а також вимоги до добрив або зрошення. Для більшості цих застосувань потрібні довідкові дані, які репрезентативно характеризують мінливість цільових явищ у просторі та часі. Ця сильна залежність від сільськогосподарських довідкових даних є прикрою, оскільки такі високоякісні довідкові дані часто відсутні чи не доступні. Отже, продукти, що виробляються на звичайному рівні, просторово явні та тематично деталізовані продукти сільськогосподарських культур є рідкісними. Дані Cropland Data Layer (CDL) виробляється щорічно з 2008 року Національною службою статистики сільського господарства США. Вони охоплюють всю континентальну територію США і ґрунтуються на контрольованій класифікації на рівні штатів, використовуючи зображення, отримані датчиками різної середньою роздільною здатністю (30–100 м), наприклад, Landsat, Sentinel-2, CBERS, IRS та DMC. Цей підхід широко використовує інформацію на рівні поля, надану фермерами, яка надає інформацію про тип врожаю на полі. Ці дані потім використовуються для підготовки контрольованих моделей класифікації та призводять до дуже високої точності для більшості важливих культур урожаю. У Канаді щорічна інвентаризація посівів надає загальнонаціональні карти посівів на рівні поля на основі контрольованої класифікації оптичних та SAR-зображень із ряду датчиків та широкого набору даних *in situ* з 2012 року. В Європі детальна інформація щодо земельних ділянок сільськогосподарських земель на рівні земельних ділянок існує у формі інформаційної системи земельних ділянок (LPIS) та даних про застосування геопросторової допомоги (GSAA), яка відстежує індивідуальні претензії на субсидії, внесені фермерами. Обидва джерела даних, LPIS та GSAA, є невід'ємним елементом реалізації спільної сільськогосподарської політики Європейського Союзу (ЄС). На жаль, дані LPIS в Європі зазвичай конфіденційні, оскільки вони містять конфіденційну інформацію, наприклад, про окремих землевпорядників та отримані ними субсидії. Деякі

європейські країни, такі як Нідерланди чи Австрія, почали надавати дані LPIS, іноді в рамках інфраструктури Європейської комісії (ЄК) для просторової інформації в Європі (INSIRES), тоді як Німеччина та більшість інших країн ЄС не оприлюднили їх дані. Незважаючи на те, що діючі карти на посівах на основі віддаленого зондування для Європи недоступні, перші дані про національні масштабні сільськогосподарські культури були отримані з даних Sentinel-2 та Landsat в контексті проекту Sentinel for Agriculture [13].

Останні досягнення в галузі машинного навчання мають значний потенціал для вдосконалення попередньої обробки даних, таких як синтез сенсорів та заповнення проміжків, а також для підвищення продуктивності сільськогосподарських та наземних культур охоплюють класифікації шляхом адаптації таких методів, як глибоке навчання.

Враховуючи насущні суспільні потреби, необхідні унікальні вимоги до моніторингу сільського господарства та характеру спостережень, дистанційного зондування, аналізу та стратегії обробки, що дозволяють проводити точний та просторовий детальний моніторинг сільського господарства на великих територіях. На щастя, якість та кількість даних оптичного дистанційного зондування середньої роздільної здатності значно зросли. Дані з Landsat стали вільно доступними у 2008 році і це різко збільшило його використання та спричинило багато інноваційних типів аналізів. Зовсім недавно Європейська програма Коперника призвела до збільшення обсягів вільно доступних даних Sentinel-2 a / b (S2) та його багатоспектрального візуалізатора. Хоча міркування щодо безперервності з Landsat та Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT) були важливими для дизайну місії, центральні вдосконалення для MSI включають нові спектральні смуги, покращене просторове розділення, більшу ширину шару, що в сузір'ї Близнюків пропонує значно покращений часовий режим частоти спостереження.

Незважаючи на збільшення частоти повторень, оптичні знімки все ще залежать від умов ясного неба для отримання якісних зображень, а стійке хмарне покриття може замаскувати вирішальні фази розвитку врожаю. Інтеграція даних з декількох

датчиків, що мають схожі спостережні характеристики, може значно покращити кількість спостережень за ясным небом. Тимчасовий синтез за допомогою композиції зображень - це цінний набір інструментів для комбінування даних з супутників з декількома сенсорами або з декількома етапами зйомки. Крім того, він має велике значення для моніторингу підходів, орієнтованих на великі райони, оскільки пропонує ряд переваг для інтеграції та аналізу даних. По-перше, перспектива обробки на основі пікселів дозволяє використовувати всі зображення, включаючи частково мутні зображення. По-друге, часові та просторово неоднорідні спостереження на рівні пікселів можуть бути перетворені у часові ряди рівновіддалених та послідовних наборів даних. Такі рівновіддалені особливості потрібні багатьма методами і, як правило, полегшують використання більш складних процесів обробки. По-третє, композиція також являє собою невід'ємний крок для отримання сітчастих продуктів більш високого рівня, які загалом рідкісні для даних середньої роздільної здатності. Композиція може також забезпечити інтегровану оцінку якості, враховуючи кілька таких параметрів, як аерозольна оптична глибина або інші проксі для атмосферних впливів, які можуть бути вигідними для подальшого аналізу робочих процесів.

Тимчасова композиція лише нещодавно стала життєздатним варіантом обробки даних середньої роздільної здатності.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ

2.1 Опис методів корегістрації

Одним з варіантів вирішення завдання сегментації потоків даних є виділення ключових ключових точок на зображенні. Пошук ключових точок, в свою чергу, спирається на формалізацію опису зображення: знаходження дескрипторів зображення і їх порівняння між собою в заданій метриці. Дескриптори повинні бути унікальними і володіти рядом властивостей, таких як інваріантність до різних перетворень, стійкість. Зрозуміло, що при вирішенні реальних завдань дескриптори не володіють відразу всіма зазначеними характеристиками, тому, залежно від особливостей предметної області та технічних характеристик аналізованих зображень, вибирається той, який найкращим чином задовільняє пріоритетній функціональності. В статті *Survey of image registration methods* авторів Roger D. Eastman, Nathan S. Netanyahu and Jacqueline Le Moigne докладніше розглянуті вимоги, що пред'являються до дескрипторів і їх класифікація [14].

Залежно від використовуваного математичного апарату, алгоритми пошуку ключових точок зображення можуть бути спрямовані на пошук кутів (особливі точки, які формуються з двох або більше граней, які, як правило, визначають межу між різними об'єктами і/або частинами одного і того ж об'єкта) і описом зображення в термінах регіонів (blobs). До першої групи, наприклад, можна віднести детектор Харріса, метод FAST, до другої - SIFT, SURF, BRIEF. Процес побудови можна умовно розділити на виявлення ключових точок зображення і безпосередньо формування дескриптора.

Аналіз зображень вимагає великих обчислювальних ресурсів. Головною перевагою представлення сигнатури в вигляді дескриптора є обчислювальна ефективність. Однак, такий підхід не має необхідної для подання складної семантики зображення інформації. Для вирішення цієї проблеми можна використовувати конкатенацію дескрипторів окремих областей. Це робить більш здійсненою можливість поділу

зображення на окремі об'єкти, зберігаючи інформацію про просторовий розподіл останніх. Говорячи про аналіз супутникових знімків, слід враховувати, що вони можуть як сильно відрізнятися один від одного, так і містити зовсім незначні відмінності, тому і кількість загальних ключових точок може бути досить великою. Зважаючи на це, слід ретельно вибирати метрику їх порівняння, що дозволяє детектувати незначні зміни, але в той же час, стійку до шумів і похибок обчислень.

Для виявлення найбільш підходящого дескриптора ключових точок для сегментації зображень проведено аналіз часто використовуваних алгоритмів.

Аналізовані підходи детектування ключових точок і їх дескрипторів.

Проведено порівняння результатів пошуку ключових точок на знімках наступними методами: FAST, CenSurE, SIFT, SURF, ORB, кутовий детектор Харріса, BRISK. Для побудови дескрипторів на базі отриманої множини точок використано алгоритми: SIFT, SURF, ORB, BRIEF, BRISK, FREAK [15]. Результуючі дескриптори порівнювалися між собою наступними алгоритмами: метод найближчого сусіда, метод повного перебору.

Розглянемо основні принципи, які використовуються при побудові вищезазначених алгоритмів.

FAST (Features from Accelerated Segment Test).

Для точки-кандидата P за допомогою алгоритму Брезенхема будується коло з 16 пікселів. Точка є кутовою, якщо для неї існують N суміжних пікселів на колі, інтенсивності яких більше $IP + t$ або інтенсивності всіх менше $IP - t$, де IP – інтенсивність точки P , t - гранична величина. Далі необхідно порівняти інтенсивність в вертикальних і горизонтальних точках на колі з інтенсивністю в точці P . Якщо для 3 з цих точок виконається умова $IP_i > IP + t$ або $IP_i < IP - t$, $i = 1, \dots, 4$, то проводиться повний тест для всіх 16 точок.

CenSurE (Center Surround Extremas for Realtime Feature Detection and Matching). Визначення ключових точок відбувається в 3 кроки. На першому обчислюються відгуки на спрощену дворівневу функцію LoG (Laplacian of Gaussian) і малі відкида-

ються. В результаті визначаються межі на зображенні. На другому кроці обчислюються локальні екстремуми. Після цього за допомогою метрики Харріса визначаються екстремуми з високим відгуком. Як дескриптор застосовується MU-SURF, який використовує зважені Гауссіаном (з параметром згладжування 2.5) вейвлети Хаара для обчислення відгуків в горизонтальному і вертикальному напрямках для областей.

ORB.

Використовує також алгоритм FAST для знаходження ключових точок. FAST приймає як параметр порогове значення інтенсивності між центральним пікселем і описаного навколо нього кола. У ORB використовується модифікація FAST-9 (радіус кола приймається рівним 9), оскільки вона виявилася найбільш ефективною з точки зору продуктивності. Після виявлення потенційних ключових точок використовується кутовий детектор Харріса для їх уточнення. Щоб отримати N ключових точок, спочатку використовується низький поріг для того, щоб отримати більше N точок, потім вони упорядковуються за допомогою метрики Харріса і вибираються перші N точок. Для побудови дескриптора отриманих точок використовується модифікація BRIEF, інваріантна до повороту за рахунок додаткових перетворень.

Кутовий детектор Харріса.

Для зображення I розглядається вікно W з центром (x, y) , а також його зрушення на (u, v) і обчислюється зважена сума квадрата різниць (sum of squared differences - SSD) між зрушенням і вихідним вікном. Кут характеризується великими змінами цієї величини. Інваріантний до поворотів.

BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features).

Дескриптор, який дозволяє представити вихідне зображення у вигляді бінарних рядків, побудованих для областей. Згладжене зображення розділяється на ділянки і для них унікальним чином вибирається набір точок $n_d(x, y)$. потім для них порівнюється інтенсивність. В результаті отримуємо бінарну рядок розмірності n_d (128, 256 або 512). Отримані дескриптори порівнюються за допомогою метрики Хеммінга.

BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints).

До кругових околиць потенційних ключових точок застосовується Гаусове згладжування. Для визначення напрямку ключової точки використовується сума локальних градієнтів.

FREAK (Fast Retina Keypoint).

Подібно BRISK використовує кругові околиці точок, з тією відмінністю, що має велику щільність точок ближче до центру (зростає експоненціально). Кожна околиця згладжується фільтром Гаусса. Для обчислення орієнтації точок використовується механізм подібний BRISK, але аналіз відбувається не для довільно обраних точок, а з використанням множини з 45 симетрично розташованих пар точок з заданим розташуванням.

Алгоритми SIFT та SURF використовуються найчастіше для вирішення задач корегістрації, тому розглянемо їх більш детально.

SIFT (Scale Invariant Feature Transform).

Основним моментом у знаходженні особливих точок є побудова піраміди гауссіанов (Gaussian) і різниць гауссіанов (Difference of Gaussian, DoG) [16]. Гауссіаном (або зображенням, розмитим гаусовим фільтром) є зображення:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y), \quad (1.1)$$

де L - значення гаусіана в точці з координатами (x, y) , σ - радіус розмиття, G - гауссово ядро, I - значення вихідного зображення, $*$ - операція згортання.

Різницею гаусіанів називають зображення, отримане шляхом віднімання кожного пікселя одного гауссіана вихідного зображення із гаусіана з іншим радіусом розмиття:

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma). \quad (1.2)$$

Простором, що масштабується на зображення є набір усіх, згладжених деяким фільтром, версій вихідного зображення. Доведено, що гаусовий простір що масшта-

бується є лінійним, інваріантним щодо зрушень, обертань, масштабу, не зміщує локальні екстремуми, і має властивість напівгруп. Для нас важливо, що різна ступінь розмиття зображення гаусовим фільтром може бути прийнята за вихідне зображення, взяте в деякому масштабі.

Загалом, інваріантність щодо масштабу досягається за рахунок знаходження ключових точок для вихідного зображення, взятого в різних масштабах. Для цього будується піраміда гауссіанів: весь простір розбивається на деякі ділянки - октави, причому частина простору, що займає наступна октави, в два рази більше частини, займаної попередньою. До того ж, при переході від однієї октави до іншої робиться ресемплінг зображення, його розміри зменшуються вдвічі. Кожна октава охоплює безліч гауссіанов зображення, тому будується тільки деяка їх кількість N , з певним кроком по радіусу розмиття. З тим же кроком добудовуються два додаткових гауссіана (всього виходить $N + 2$), що виходять за межі октави. Масштаб першого зображення наступної октави дорівнює масштабу зображення з попередньої октави з номером N .

Паралельно з побудовою піраміди гауссіанів, будується піраміда різниць гауссіанів, що складається з різниць сусідніх зображень в піраміді гауссіанів. Відповідно, кількість зображень в цій піраміді буде $N + 1$.

На рисунку 2.1 зліва зображено піраміду гауссіанів, а праворуч - їх різниць [16]. Схематично показано, що кожна різниця виходить з двох сусідніх гауссіанів, кількість різниць на одиницю менше кількості гауссіанов, при переході до наступної октави розмір зображень зменшується вдвічі.

Будемо вважати точку особливою, якщо вона є локальним екстремумом різниці гауссіанов. Для пошуку екстремумів будемо використовувати метод, схематично зображений на рисунку 2.2

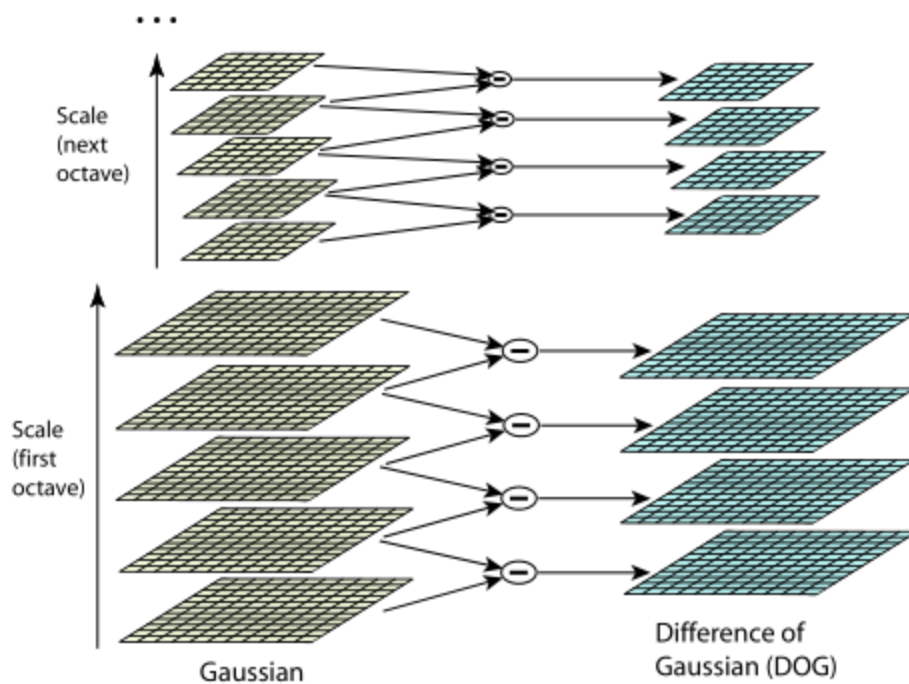


Рисунок 2.1 – Піраміда гаусіанів та їх різниць

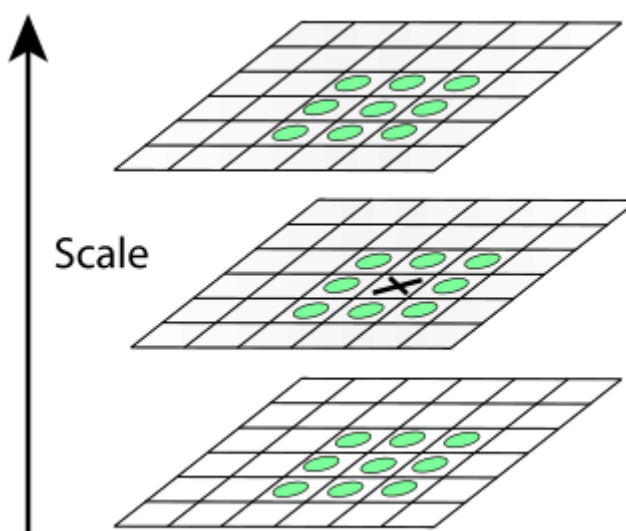


Рисунок 2.2 – Метод пошуку екстремумів

Якщо значення різниці гаусіанів в точці з позначкою хрестиком, більше (менше) всіх значень в точках, позначених зеленими колами, то ця точка вважається точкою екстремуму.

У кожному зображенні з піраміди DoG шукаються точки локального екстремуму. Кожна точка поточного зображення DoG порівнюється з її вісьмома сусідами і з дев'ятьма сусідами в DoG, що знаходяться на рівень вище і нижче в піраміді. Якщо ця точка більше (менше) всіх сусідів, то вона приймається за точку локального екстремуму.

Наступним кроком буде пара перевірок придатності точки екстремуму на роль ключової.

Насамперед визначаються координати особливої точки з субпіксельною точністю. Це досягається за допомогою апроксимування функції DoG багаточленом Тейлора другого порядку, взятого в точці обчисленого екстремуму:

$$D(X) = D + \nabla D \cdot X + \frac{1}{2} X^T H D X, \quad (1.3)$$

де D - функція DoG, $X = (x, y, \sigma)$ - вектор зміщення відносно точки розкладання, перша похідна DoG - градієнт, друга похідна DoG - матриця Гессе.

Екстремум багаточлена Тейлора знаходиться шляхом обчислення похідної та прирівнювання її до нуля. В результаті отримаємо зсув точки обчисленого екстремуму, щодо точного

$$\hat{x} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial x^2} \frac{\partial D}{\partial x} \quad (1.4)$$

Коли становище точки екстремуму обчислено, перевіряється на малість саме значення DoG в цій точці за формулою

$$D(\hat{x}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^T}{\partial x} \hat{x} \quad (1.5)$$

Якщо ця перевірка не проходить, то точка виключається, як точка з малим контрастом.

Після того, як ми переконалися, що якась точка є ключовою, потрібно обчислити її орієнтацію. Як буде видно далі, точка може мати кілька напрямків.

Напрямок ключової точки обчислюється виходячи з напрямків градієнтів точок, сусідніх з особливою. Всі обчислення градієнтів виробляються на зображенні в піраміді гауссіанов, з масштабом найбільш близьким до масштабу ключової точки. Величина і напрямок градієнта в точці (x, y) обчислюються за формулами:

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x + 1, y) - L(x - 1, y))^2 + (L(x, y + 1) - L(x, y - 1))^2} \quad (1.6)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}((L(x, y + 1) - L(x, y - 1)) / (L(x + 1, y) - L(x - 1, y))) \quad (1.7)$$

де m - величина градієнту, θ - його напрям.

Побудова дескрипторів. У методі SIFT дескриптором є вектор. Як і напрямок ключовий точки, дескриптор обчислюється на гауссіане, найближчому за масштабом до ключовій точці, і виходячи з градієнтів в деякому вікні ключовий точки. Перед обчисленням дескриптора це вікно повертають на кут напрямку ключовий точки, чим і досягається інваріантність щодо повороту.

Кожному градієнту в вікні дескриптора можна приписати три речові координати (x, y, n) , де x - відстань до градієнта по горизонталі, y - відстань по вертикалі, n - відстань до напрямку градієнта в гістограмі (мається на увазі відповідна гістограма дескриптора, в яку вносить вклад цей градієнт). За точку відліку береться лівий нижній кут вікна дескриптора і початкове значення гістограми. За поодинокі відрізки беруться розміри регіонів по горизонталі і вертикалі для x і y відповідно, і кількість градусів в компоненті гістограми для n . Коефіцієнт трилинейной інтерполяції визначається для кожної координати (x, y, n) градієнта як $1-d$, де d дорівнює відстані від координати градієнта до середини того одиничного проміжку в який ця координата

потрапила. Кожне входження градієнта в гистограму множиться на всі три вагові коефіцієнти трилинейної інтерполяції.

Дескриптор ключовий точки складається з усіх отриманих гістограм. Як вже було сказано розмірність дескриптора на малюнку 32 компоненти ($2 \times 2 \times 8$), але на практиці використовуються дескриптори розмірності 128 компонент ($4 \times 4 \times 8$).

Отриманий дескриптор нормалізується, після чого всі його компоненти, значення яких більше 0.2, урізаються до значення 0.2 і потім дескриптор нормалізується ще раз. У такому вигляді дескриптори готові до використання.

SIFT дескриптори не позбавлені недоліків. Не всі отримані точки і їх дескриптори будуть відповідати вимогам, що пред'являються. Природно це буде позначатися на подальшому вирішенні завдання зіставлення зображень. У деяких випадках рішення може бути не знайдено, навіть якщо воно існує. Наприклад, при пошуку афінних перетворень (або фундаментальної матриці) за двома зображенням цегляної стіни може бути не знайдено рішення через те, що стіна складається з повторюваних об'єктів (цегли), які роблять схожими між собою дескриптори різних ключових точок. Незважаючи на цю обставину, дані дескриптори добре працюють в багатьох практично важливих випадках. Плюс до всього, цей метод запатентований.

SURF (Speeded Up Robust Features).

Метод SURF позитивно зарекомендував себе в задачах пошуку об'єктів на зображеннях, 3D реконструкції, при порівнянні зображень [17].

Метод SURF вирішує два завдання - пошук особливих точок зображення і створення їх дескрипторів (описового елемента, інваріантного до зміни масштабу і повороту). Крім того, сам пошук ключових точок теж повинен володіти інваріантністю, тобто повернений об'єкт сцени повинен володіти тим же набором ключових точок, що і зразок.

Для знаходження особливих точок використовується матриця Гессе. Детермінант матриці Гессе (гессіан) досягає екстремуму в точках максимальної зміни градієнта яскравості. Після знаходження ключових точок, метод SURF формує їх дескриптори. Дескриптор являє собою набір з 64 (або 128) чисел для кожної ключової точки.

Ці числа відображають флуктуації градієнта навколо ключової точки. Інваріантний до повороту. Розглянемо ключові моменти алгоритму:

1. Пошук ключових точок зображення

Ключова точка зображення - точка, яка має деякі ознаки, істотно відрізняють її від основної маси точок (різкі перепади освітленості, кути і т.д.). Ключові точки зображення шукаються шляхом аналізу визначника матриці Гессе для кожного пікселя зображення:

$$\det(H) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} * \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}\right)^2 \quad (1.8)$$

Для того, щоб алгоритм був стійкий до масштабування зображення, використовують різні розміри області, по якій беруться другі похідні.

Якщо значення визначника перевищило спеціально встановлений поріг, то вважається, що знайдена ключова точка. Така операція виконується для кожного пікселя зображення.

2. Знаходження орієнтації ключової точки зображення

Для кожної такої ключової точки в її околиці шукається напрямок вектора максимального перепаду функції інтенсивності зображення поблизу даного пікселя з використанням фільтрів Хаара. Варто зазначити, що розміри фільтрів, а також розміри аналізованої околиці вибираються відповідно до розміру області взяття других похідних.

3. Побудова дескриптора ключової точки зображення

Навколо ключової точки описується прямокутна область. Ця область розбивається на 16 квадрантів однакових розмірів. Прямокутна область потім повертається відповідно до орієнтації ключової точки. На наступному кроці зважуються оцінки для кожного з 16-ти квадрантів області за допомогою фільтрів Хаара:

$$\sum dx, \sum |dx|, \sum dy, \sum |dy| \quad (1.9)$$

Розміри прямокутної області, а також розміри фільтрів Хаара залежать від розміру області взяття других похідних.

В результаті виходить вектор з 64-х чисел. До опису точки також додають слід матриці Гессе. Вектор і слід матриці разом утворюють дескриптор ключової точки. На даному етапі алгоритм SURF закінчується.

4. Аналіз переваг і недоліків алгоритму

За рахунок використання других похідних алгоритм SURF стає інваріантний до перепадів яскравості. Завдяки використанню різних розмірів області взяття других похідних і обчисленню орієнтації ключових точок алгоритм стає інваріантний до зміни масштабу і повороту особи людини в площині зображення.

2.2 Аналіз точності роботи алгоритмів кореєстрації за допомогою пакету MATLAB

Середовище розробки MATLAB має додаткове розширення Registration Estimator (рисунок 2.3), яке дозволяє проводити співставлення зображень використовуючи 3 категорії методів:

- методи виділення спільних ознак SURF, FAST, BRISK, Harris, MinEigen, MSER;
- методи, що базуються на виділенні інтенсивності сірого кольору на зображенні Monomodal, Multimodal Intensity, Phase Correlation;
- метод Nonrigid.

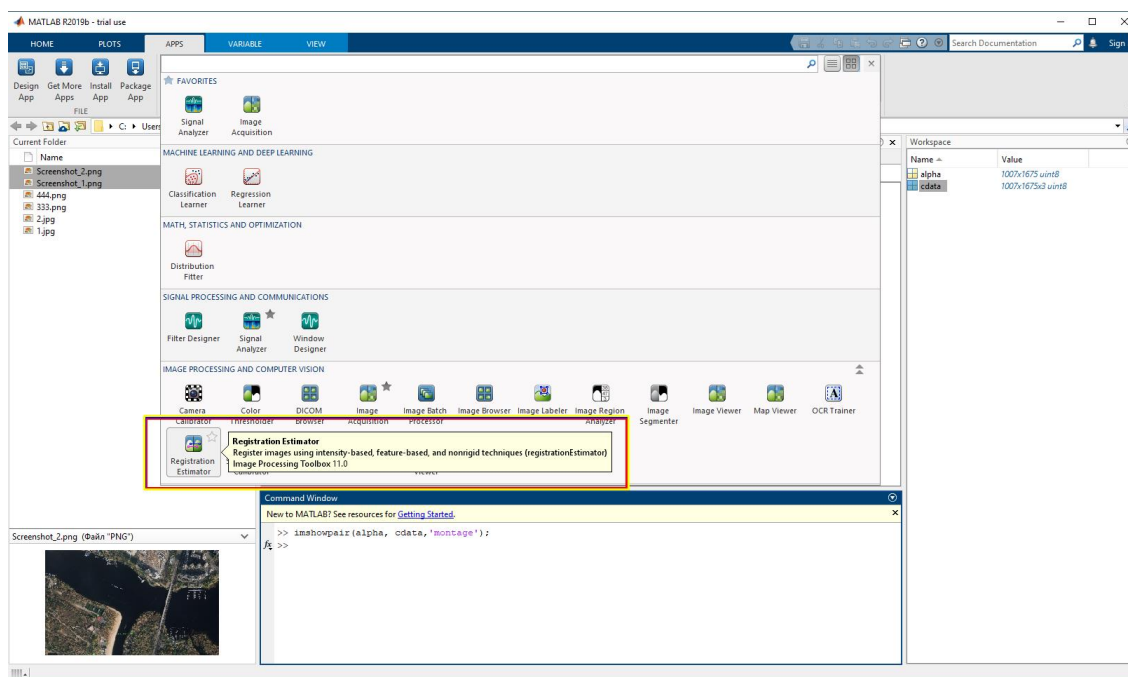


Рисунок 2.3 – Додаток Registration Estimator

Для кожного методу у додатку передбачений набір вхідних параметрів, які необхідно підібрати для отримання найкращого результату. Інтерфейс додатку простий і зрозумілий.

Проведемо експериментальне дослідження якості кожного алгоритму за допомогою Registration Estimator. Для вхідних даних використаємо два оптичні супутникові знімки з Sentinel-1, знятих з різної позиції. Супутниковий знімок охоплює район міста Києва (рисунок 2.4).

Завантажуємо знімки у програму, обираємо параметри методів і запускаємо процес співставлення. Результат наведено на рисунку 2.5.

Жоден з методів не знайшов однорідних ключових точок на обох зображеннях. Можна зробити висновок, що реалізовані методи у MATLAB не достатньо точні для роботи зі супутниковими знімками.

Проведемо експериментальне дослідження якості роботи цих алгоритмів, використавши у якості вхідних даних дві фотографії предметів (рисунок 2.6).

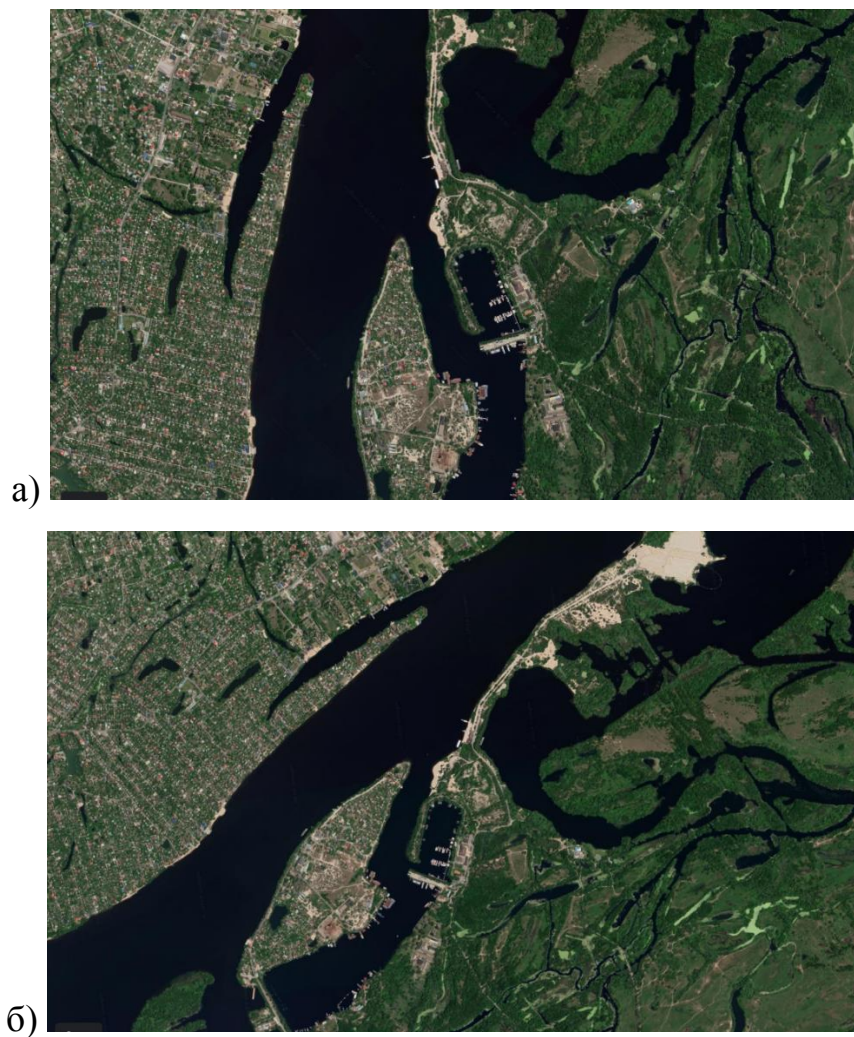


Рисунок 2.4 – Обрані для кореєстрації два оптичних супутникових знімки:
а) знімок №1; б) знімок №2.

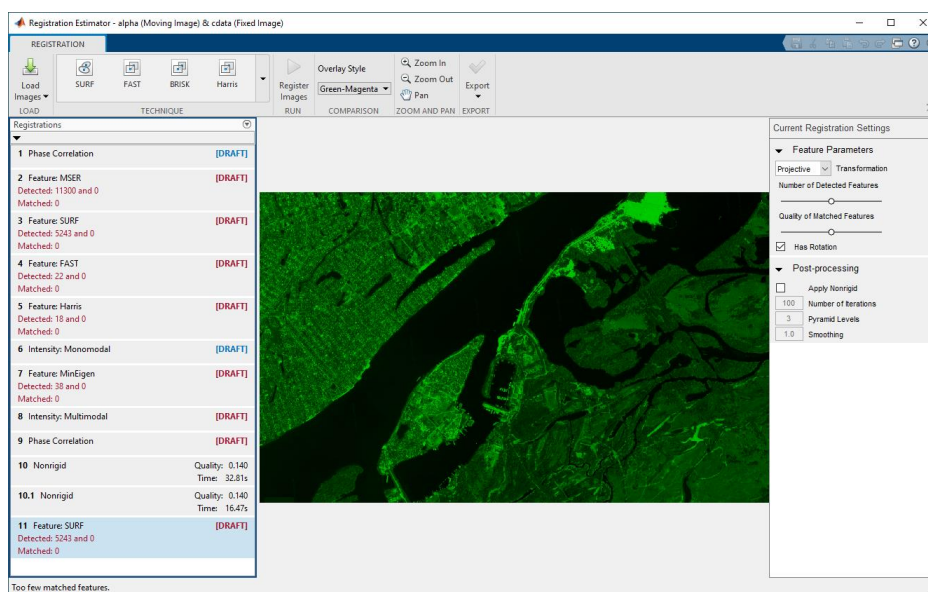


Рисунок 2.5 – Результат роботи алгоритмів зі супутниковими даними



Рисунок 2.6 – Дві фотографії для проведення експерименту:

а) фотографія №1; б) фотографія №2.

Імпортуємо файли зображень у програму і проводимо процес співставлення.

Для методу SURF обираємо наступні параметри:

- вид трансформації – проекція;
- кількість визначених ключових точок – 2000;
- якість вибору ключових точок – 0.7;
- поворот зображення – присутній.

Результат роботи методу SURF бачимо на рисунку 2.7. Було визначено 1251 ключова точка для першого зображення та 1148 точок для другого зображення. Спільних точок визначено 101. Час роботи алгоритму – 10.23 с.

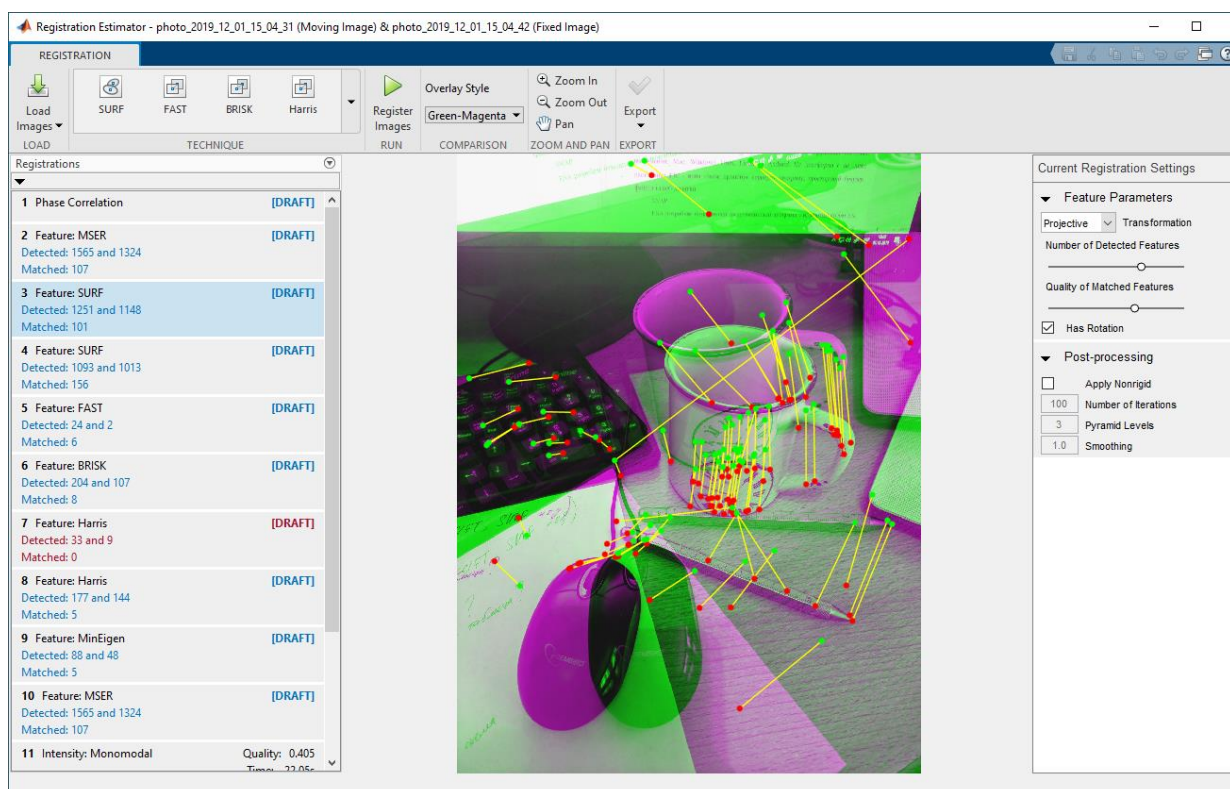


Рисунок 2.7 – Результат роботи алгоритму SURF

При збільшенні числа визначених ключових точок результат точності не змінився. Постообробка результатів не дала. При зміні методу трансформації не було знайдено жодної ключової точки.

Візуально якість співставлення низька.

Незважаючи на те, що теоретично алгоритм SURF має бути інваріантним до повернення об'єкту в площині, отриманий результат є незадовільним.

Для методу FAST обираємо наступні параметри:

- вид трансформації – проекція;
- кількість визначених ключових точок – 2000;
- якість вибору ключових точок – 0.7;
- поворот зображення – присутній.

Результат роботи методу FAST бачимо на рисунку 2.8. Було визначено 24 ключові точки для першого зображення та 2 точки для другого зображення. Спільних точок визначено 6. Час роботи алгоритму – 08.56 с.

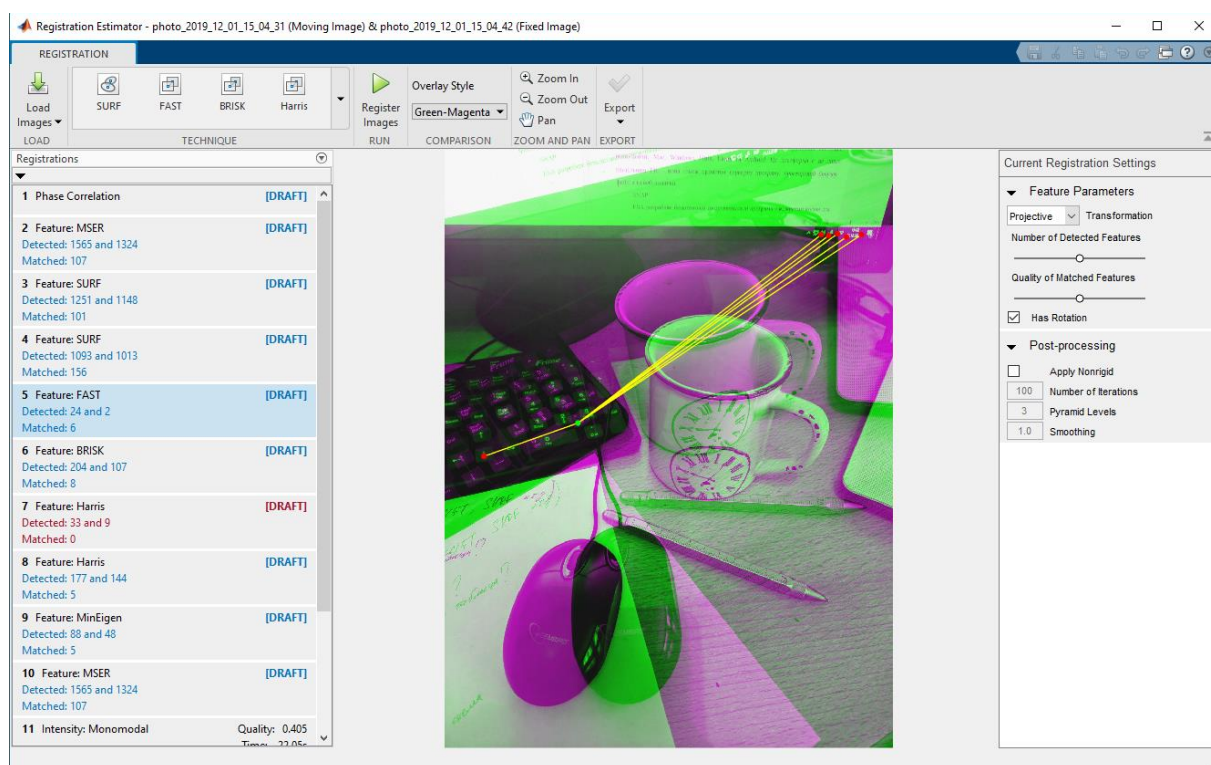


Рисунок 2.8 – Результат роботи алгоритму FAST

Зміна параметрів не дає кращого результату. Якість роботи алгоритму дуже низька.

Для методу BRISK обираємо наступні параметри:

- вид трансформації – проекція;
- кількість визначених ключових точок – 2000;
- якість вибору ключових точок – 0.7;
- поворот зображення – присутній.

Результат роботи методу BRISK бачимо на рисунку 2.9. Було визначено 204 ключових точок для першого зображення та 107 точки для другого зображення. Спільних точок визначено 5. Час роботи алгоритму – 12.60 с.

При зміні методу трансформації на афінне, результат значно покращився. Якість роботи алгоритму – 0.462. Час – 2с.

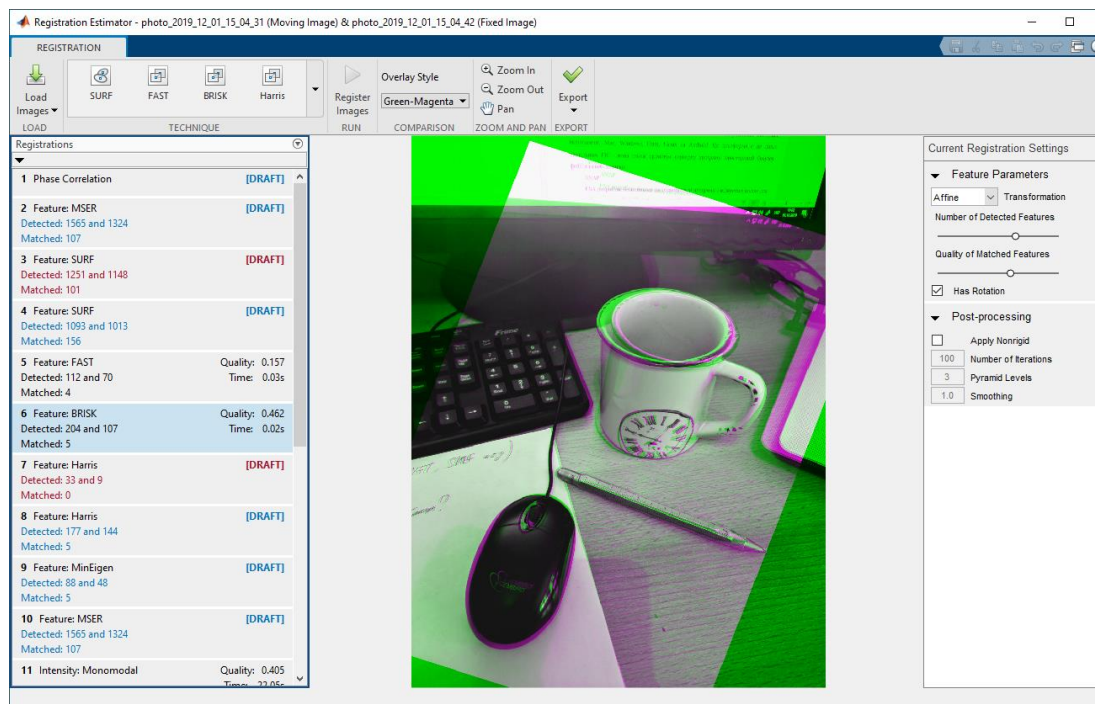


Рисунок 2.9 – Результат роботи алгоритму BRISK

Для методу Harris обираємо наступні параметри:

- вид трансформації – проекція;
- кількість визначених ключових точок – 2000;
- якість вибору ключових точок – 0.7;
- поворот зображення – присутній.

Результат роботи методу Harris бачимо на рисунку 2.10. Було визначено 177 ключових точок для першого зображення та 44 точки для другого зображення. Спільних точок визначено 5. Час роботи алгоритму – 15.07 с.

Для методу Monomodal обираємо наступні параметри:

- трансформація – подібне;
- максимальна кількість ітерацій – 100;

- кількість рівнів пірамід – 3;
- застосування гаусівського розмиття – 50%.

Результат роботи методу Monomodal бачимо на рисунку 2.11. Точність 0.404.

Час роботи алгоритму – 21.91 с.

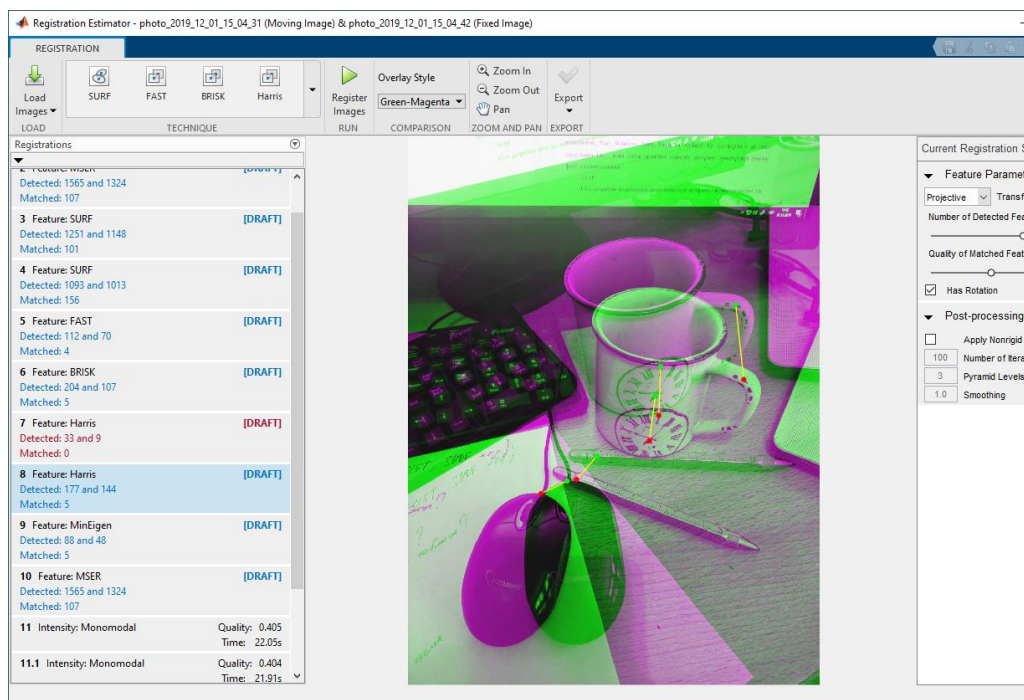


Рисунок 2.9 – Результат роботи алгоритму Harris

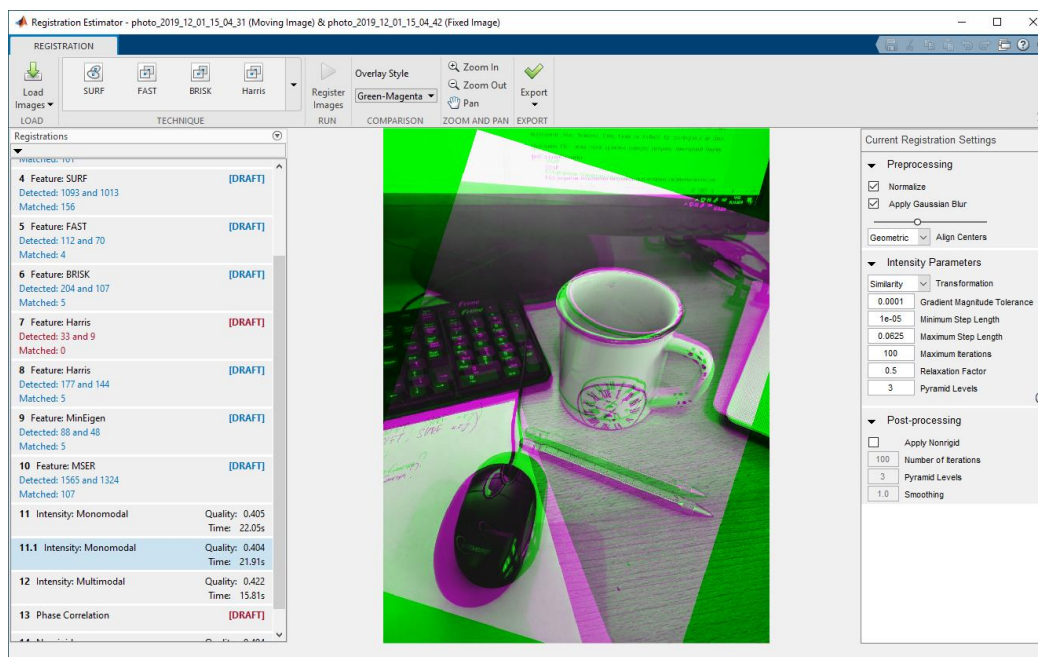


Рисунок 2.11 – Результат роботи алгоритму Monomodal

При збільшенні значення гаусівського розмиття, якість істотно не змінився. В той же час, зменшення кількості рівнів перамід призвело до зниження точності (0.352).

При зміні методу трансформації на Rigit, то збільшується якість роботи алгоритму до 0.431.

Для методу Multimodal Intensity обираємо наступні параметри:

- трансформація – подібне;
- максимальна кількість ітерацій – 100;
- кількість рівнів пірамід – 3;
- застосування гаусівського розмиття – 50%;
- число гістограм – 50;
- фактор росту – 1.05;

Результат роботи методу Multimodal Intensity бачимо на рисунку 2.12. Точність 0.468. Час роботи алгоритму – 15.44 с.

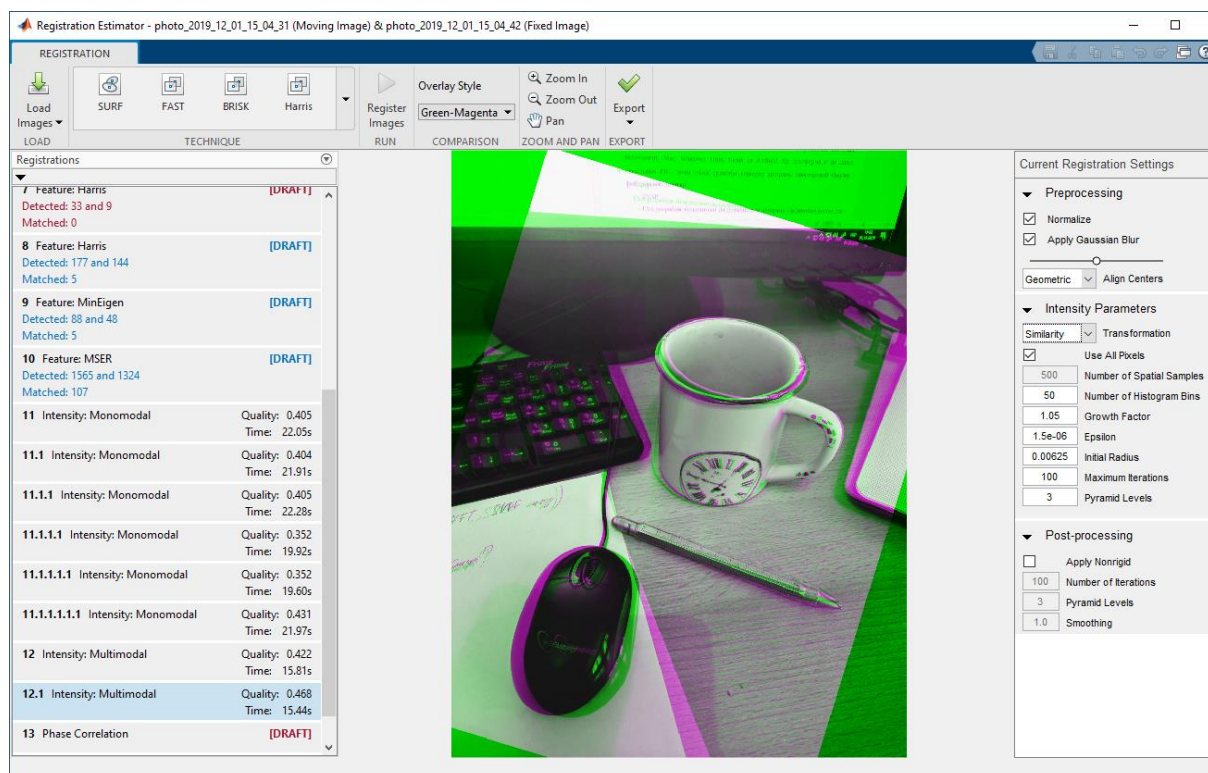


Рисунок 2.12 – Результат роботи алгоритму Multimodal Intensity

Цей метод дав найкращі результати. Якщо включити пост обробку зображень, то точність результату зростає до 0.592. Результат на рисунку 2.13.



Рисунок 2.13 – Результат роботи алгоритму Multimodal Intensity з постобробкою

Інші методи не виявили жодних ключових точок.

Отже, результати роботи алгоритмів наведені у таблиці 2.1. У додатку 1 наведено графік порівняння роботи алгоритмів, що реалізовано у MATLAB.

2.3 Огляд існуючих систем

Система QGIS. QGIS - безкоштовне програмне забезпечення GIS з основними плагінами та функціями, що пропонують загальні функції GIS. Програмне забезпечення дає можливість переглядати та накладати растрові та векторні дані у різних форматах та проекціях, не перетворюючи їх у загальні чи внутрішні файли [18].

Це дозволяє інтерактивно вивчати просторові дані та складати карти за допомогою зручного графічного інтерфейсу користувача (GUI). Інтерфейс використовує численні корисні інструменти, включаючи диспетчер БД, просторові закладки, браузер

QGIS, інструменти для анотацій, панель огляду, композитор карт, під час перегляду проектів тощо.

Крім того, QGIS дозволяє створювати, керувати, редагувати та експортувати растрові та векторні дані у декількох форматах. Платформа пропонує чудові інструменти оцифрування для векторних шарів GRASS та підтримуваних форматів OGR.

QGIS також дозволяє легко аналізувати просторові дані у всіх базах даних та інших форматах, підтримуваних OGR. Програмне забезпечення пропонує вибірки, векторний аналіз, геопереробку, управління базами даних та інструменти геометрії. Це дозволяє легко інтегрувати інструменти GRASS або легко працювати з плагіном обробки. Ця комбінація забезпечує потужну основу для геопросторового аналізу, яка допомагає викликати сторонні та натільні алгоритми.

Ще одна перевага - можливість розширення функціональності QGIS за допомогою плагінів. Розширювані бібліотеки плагінів та архітектура полегшують адаптацію платформи до ваших особливих потреб. Крім того, легше створювати додаткові програми за допомогою Python або C ++.

Також програмне забезпечення працює на багатьох операційних системах, включаючи; Mac, Windows, Unix, Linux та Android. Ця платформа є не лише настільним ГІС - вона також пропонує серверну програму, просторовий браузер файлів та веб-додатки.

Система SNAP. ESA розробляє безкоштовні інструментальні програми з відкритим кодом для наукової експлуатації місій спостереження Землі в рамках програмного елемента «Наукова експлуатація оперативних місій» (SEOM). STEP - це платформа спільноти ESA для доступу до програмного забезпечення та його документації, спілкування з розробниками, ведення діалогу в науковій спільноті, просування результатів та досягнень, а також надання навчальних посібників та матеріалів для підготовки вчених за допомогою скриньки інструментів [18].

Набори інструментів ESA підтримують наукову експлуатацію для місій ERS-ENVISAT, місій Sentinels 1/2/3 та низки національних та сторонніх місій. Три скриньки інструментів називаються відповідно Sentinel 1, 2 та 3 Toolboxes і мають спільну

архітектуру під назвою SNAP. Вони містять деякі функціональні можливості історичних наборів інструментів, таких як BEAM, NEST та Orfeo Toolbox, розроблених за останні роки.

Загальна архітектура для всіх інструментів для Sentinel спільно розробляється Brockmann Consult, Array Systems Computing та C-S під назвою Sentinel Application Platform (SNAP).

Архітектура SNAP ідеально підходить для обробки та аналізу спостереження Землі завдяки таким технологічним нововведенням: розширюваність, портативність, модульна багата клієнтська платформа, загальна абстракція даних про ЕО, керована пам'ять та рамка обробки графіків.

Основні переваги:

- загальна архітектура для всіх панелей інструментів;
- дуже швидке відображення зображення та навігація навіть із великими зображеннями;
- Graph Processing Framework (GPF) - для створення визначених користувачем ланцюгів обробки;
- удосконалене управління шарами дозволяє додавати та маніпулювати новими накладками, такими як зображення інших діапазонів, зображення з WMS-серверів або ESRI shapefiles;
- велика база регіонів інтересів для статистики та різних сюжетів;
- легке визначення бітмаски та накладання;
- арифметика гнучкої смуги з використанням довільних математичних виразів;
- точне перепроєктування та орто-випрямлення для загальних проекцій карт;
- геокодування та виправлення за допомогою наземних точок управління;
- автоматичне завантаження та вибір плитки SRTM DEM;
- бібліотека продуктів для ефективного сканування та каталогізації великих архівів;
- підтримка багатопотокових та багатоядерних процесорів;
- комплексна візуалізація WorldWind.

3 РОЗРОБЛЕННЯ МОДИФІКОВАННОГО АЛГОРИТМУ КОРЕЄСТРАЦІЇ

3.1 Постановка проблеми

Використання даних дистанційного зондування отриманих з декількох джерел стає все більш розповсюдженим у системах дистанційного зондування (таких як комплексне спостереження за зміною поверхні землі, динамікою води та повітря), як ефективний та всебічний підхід. Система дистанційного зондування з синтезованою діафрагмою (радарні знімки, англ. SAR - Synthetic-aperture radar) працює за будь-яких погодних умов, у будь який час впродовж доби, і, таким чином, отримує все більш широкий спектр застосувань у різних сферах. Зображення SAR надають корисну інформацію про міські райони, відображаючи поверхневі характеристики міських особливостей. Однак синергетичне використання оптичних та радарних даних залишається однією із найскладніших проблем через велику різницю між пасивними та активними методами дистанційного зондування. Для синергізації оптичних та радарних зображень одним з важливих та складних кроків є спільна кореєстрація двох джерел даних. Через спектри, кути огляду та просторову роздільну здатність у радарних зображеннях, їх інтерпретувати не так просто, як оптичні зображення.

На сьогоднішній день проведено численні дослідження спільної кореєстрації зображень дистанційного зондування. Наприклад, було запропоновано багато підходів на основі функцій моментів часу, функцій отриманих від Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) and Markov Random Field model тощо, для реєстрації афінних геометричних спотворень між двома оптичними супутниковими зображеннями, такими як мультиспектральні, гіперспектральні та повітряні зображення [19]. Хоча більшість цих методів були розроблені для спільної кореєстрації двох оптичних зображень, в останні роки було запропоновано багато підходів для спільної кореєстрації двох радарних зображень. Серед цих підходів метод SIFT був удосконалений та застосований для кореєстрації між двома зображеннями SAR.

Однак, було проведено значно менше досліджень щодо кореєстрації оптичних та радарних зображень. Це питання залишається складним, оскільки зростає застосування даних SAR з різною просторовою роздільною здатністю, поляризаціями та частотами, особливо коли мова йде про міські райони, де геометричні конфігурації значно складніші. Особливості геометрії радарного дистанційного зондування в міських районах часто спричиняють проблеми пов'язані з ракурсом зйомки, накладанням та тінями від щільно розташованих високих будівель. Ці явища можуть спричинити великі труднощі з інтерпретацією або автоматичною обробкою зображень SAR порівняно з оптичними зображеннями дистанційного зондування. Отже, спільна кореєстрація між зображеннями SAR та оптичними зображеннями стає складнішою. Оскільки інформація, що міститься в даних SAR, через недосконалий вибір ракурсу, накладання та тіні втрачається і не може бути отримана з відповідних оптичних зображень, традиційний підбір ключових точок, який вважається практичним і точним методом, виявляється дуже складно провести. Така ситуація перешкоджає широкому застосуванню даних SAR щодо їх поєднання або злиття з оптичними зображеннями дистанційного зондування.

Для того, щоб подолати цю складну ситуацію та популяризувати застосування синтезу оптичних та SAR даних, необхідно розробити практичний та автоматичний метод із двохетапним підходом для спільної кореєстрації оптичних та радарних даних. З декількома початковими гомологічними точками, що генеруються автоматично на самому початку, може бути застосовано автоматичне регулювання початкових гомологічних пар для оптимізації початкових гомологічних точок за умови заданого порогу середньоквадратичних помилок (RMSE) кореєстрації. Нарешті, після визначення оціночної моделі за допомогою гомологічних балів може бути здійснена спільна кореєстрація. RMSE використовується для оцінки ефективності спільної кореєстрації.

3.2 Вимоги до системи

3.2.1 Перелік аспектів, що впливають на кореєстрацію

Нижче наведено перелік аспектів/параметрів, які можуть значно впливати на якість злиття даних або точність класифікації.

Збір/вибір даних. Різний час отримання даних:

- рік (можливі сезонні та інші зміни);
- місяць (можливі сезонні зміни);
- погодні умови під час зйомки можуть мати вплив на дані.

Тестова ділянка зйомки:

- тип місцевості;
- місцезнаходження.

Сенсор:

- тип сенсора (технічні характеристики);
- геометричні особливості зйомки.

Геореференція та орторектифікація. На результат орторектифікації (коригування знімків на основі висотної моделі місцевості у картографії) сильно впливає цифрова модель місцевості (Digital Terrain Model) та цифрова модель поверхні (Digital Surface Model). Наявність DSM має велике значення для високої якості даних. Крім того, DSM дозволяє аналізувати на основі моделювання, наприклад витяжні маски для тіней, накладання тощо, що дозволяє усунути неоднозначні ділянки зображення в ортографічному результаті [20].

Мультисенсорні дані кореєстрації. Навіть якщо орторектифікація виконана ідеально, залишаються деякі помилки, спричинені зміщенням при накладанні різних зображень. Проблема в тому, які автоматичні методи виправлення цих помилок обрати і які встановити параметри.

Виділення ознак. Виділення ознак проводиться для описання сцени на зображенні. Для цього необхідно визначити які саме ознаки мають бути виділені, чи потрібно фільтрувати ознаки, чи потрібно проводити радіометричну нормалізацію та чи використовувати початкові геометричні особливості радарних знімків.

Кластеризація. Вилічення ознак може призвести до появи великої кількості даних різних типів. Кластеризація ознак корисна для приведення незрівнянних даних у загальний вигляд та одночасного скорочення даних. Кількість кластерів слід визначати автоматично залежно від складності сцени.

Класифікація та синтез. Необхідно обрати метод синтезу даних та параметри. Обрати дані для навчання та тестування, розміри класів та їх необхідну кількість для підвищення точності.

3.2.2 Структурна схема

Для успішної кореєстрації важливим етапом є підготовка даних. Процес кореєстрації оптичних і радарних знімків представлений на структурній схемі у Додатку 1.

Детальний опис процесу кореєстрації.

Дані вхідного зображення мають мультисенсорний характер. Два можливих варіанти геометрії зйомки:

- геометрія випадкової зйомки;
- ортогональна геометрія зйомки.

Паншарпенінг оптичних мультиспектральних даних у панхроматичному діапазоні для підвищення роздільної здатності пікселів одночасно зберігаючи спектральні характеристики.

Видалення шумів та плям з радарних даних є не обов'язковим.

Використовуються додаткові дані (позначені червоним кольором):

- цифрова модель висоти (Digital Elevation Model - DEM) для геореференції;

– довідкові дані для наземних контрольних точок (GCP) та вилучення даних про навчання/тестування.

Орторектифікація зображень за допомогою доступних DEM (наприклад, SRTM)

Ручна або автоматична кореєстрація мультисенсорних зображень

3.3 Модифікований алгоритм

На рисунку 3.1 показано загальну блок-схему модифікованого методу кореєстрації. Насамперед, необхідно провести попередню обробку даних для мінімізації відмінностей у радіометричних та геометричних властивостях між оптичними та радарними зображеннями, що спричинені різними системами збору даних та різними довжинами хвиль. Далі на області зображення, які можуть викликати великі помилки при георектифікації, накладається маска: для радарного зображення використовується метод дерева квадрантів, а для оптичного зображення – пірамідальна структура. Далі будується замасковане радарне зображення. Потім оцінюється глобальна різниця перетворення застосовуючи подібність вимірюної взаємної інформації від найгрубіших до оригінальних зображень пірамід в порядку. Після зміщення зображення SAR відповідно до передбачуваного перетворення x і y напрямків, відповідні точки витягуються за допомогою лінійних функцій, а потім коректні ключові точки залишаються з урахуванням регіональних властивостей області дослідження. Трансформація поєднує лінійну функцію та афінне перетворення від ключових точок. Радарне зображення трансформується і накладається на оптичне зображення.

3.3.1 Попередня обробка

Оптичні супутникові знімки мають різну позиційну точність відповідно до розташування сенсору під час зйомки та геометричної обробки даних. Наприклад, для даних Sentinel-2 стандартна роздільна здатність близько 50 м позиційних помилок для

пласкої поверхні. Для даних Sentinel-1 системи координат виправляються DEM або GSP, позиційні помилки виникають від декількох метрів до декількох сотень метрів. Крім того, радарні зображення мають різну просторову роздільну здатність азимуту та діапазону напрямів, через різний підхід до отримання знімків за кожним напрямом. Щоб мінімізувати геометричні відмінності між двома мультисенсорними зображеннями, використаємо їх інформацію про місцезнаходження, яка витягується з метаданих, як геометричний підхід до попередньої обробки. Радарні дані включають координати знімку та його просторову роздільну здатність у кожному діапазоні та залежно від азимуту, відповідно. З цією інформацією радарні зображення за координатами ідентичні зображенням відповідного оптичного зображення, після чого витягуються розміри пікселів перекомпоновані таким чином, щоб вони були однаковими у напрямку x та у оптичного зображення.

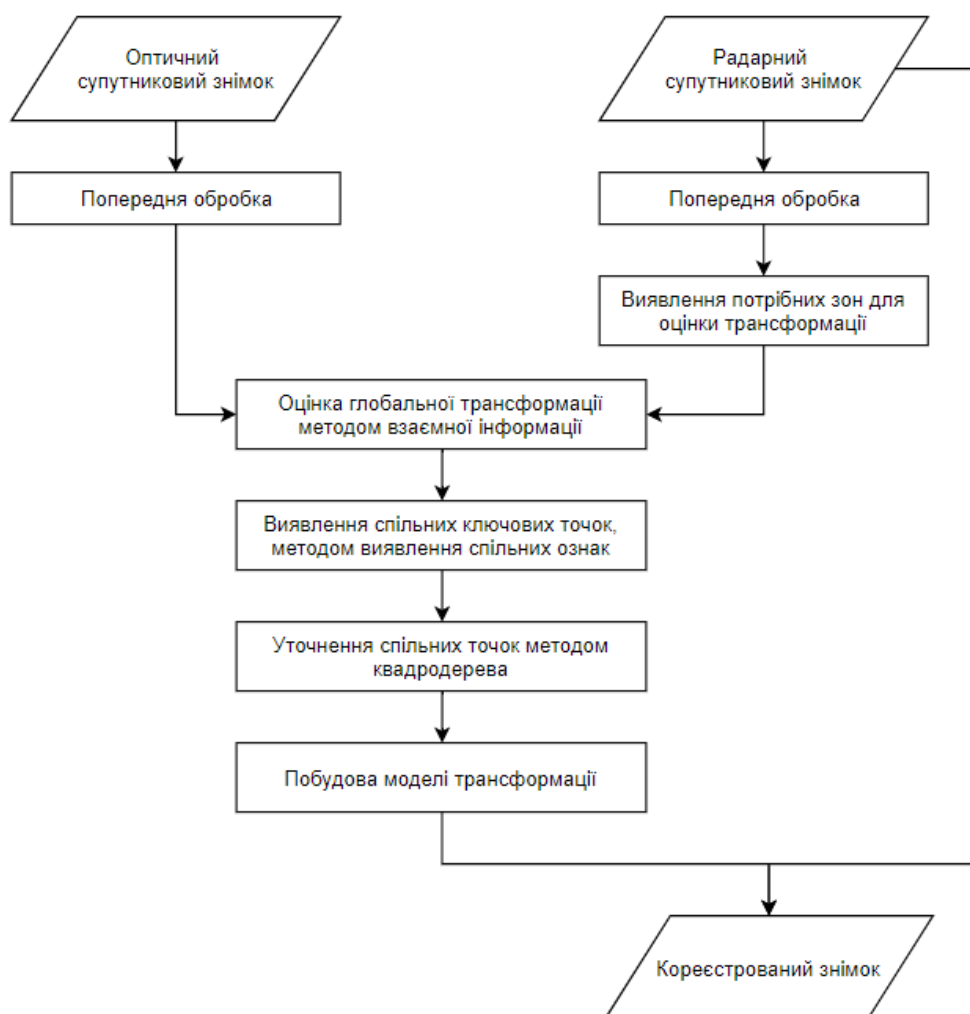


Рисунок 3.1 – Модифікований алгоритм кореєстрації

З точки зору радіометричних властивостей, присутній на радарних знімках шум, може переривати оцінку ступеня подібності або процес визначення ключових точок на радарному та оптичному знімках. Ці два процеси знаходження подібностей на двох знімках є чутливими до шуму. Існує багато варіантів фільтрів для зниження рівня шуму, але вони призводять до зниження роздільної здатності радарного знімка. Використаємо фільтр Лі для усунення шуму та відновлення оригінального сигналу [21].

3.3.2 Визначення схожих областей на зображеннях для подальшої кореєстрації

Оптичні та радарні знімки мають різні радіометричні властивості. У міській місцевості радарні знімки мають високий рівень подвійного відбиття сигналу від будівель, що спричиняє появу артефактів на зображенні. А високі об'єкти, як багатоповерхові споруди чи високі дерева, мають довгі тіні, що спричиняють геометричні похибки на оптичних знімках. Очевидний метод для знаходження неоднорідностей на радарних зображеннях полягає у використанні значень локальної дисперсії області, тому що неоднорідні області, які виникають у наслідок подвійного розсіювання сигналу, мають зазвичай більше значення локальної дисперсії порівняно з однорідними областями (через рельєф і текстуру земної поверхні). Враховуючи цю особливість, доцільним буде застосування сегментації радарних знімків за деревом квадрантів для виділення неоднорідних областей, що можуть спричинити геометричні та радіометричні розбіжності між мультисенсорними зображеннями.

Квадродерево будується шляхом рекурсивного розкладання зображення на 4 однакових за розміром області до тих пір поки мінімальна прийнятна за розміром область не буде виділена. Спочатку все зображення приймається за одну область і послідовно розкладається на підобласті. Враховуючи локальне значення дисперсії, визначаємо критерій поділу $Q(S)$:

$$Q(S) = \frac{u(S)}{u(I)} + \frac{x(S)}{x(I)}, \quad (3.1)$$

де I та S - набір пікселів всього зображення та кожної області, u та x - середнє значення та дисперсія кожної області відповідно.

Якщо значення $Q(S)$ більше ніж попередньо визначений поріг, то відповідна область підрозділяється на чотири розрізнені області квадранта; інакше вона не розщеплюється далі. Цей процес триває поки область не досягне мінімально прийнятого розміру області. З рівняння (3.1) області неодноразово підрозділяються, якщо вони мають відносно сильне зворотне розсіювання і велике значення дисперсії порівняно з усім зображенням. Область, де мінімальний розмір досягнутий визначається як невідповідна для вимірювання подібності через велику різницю між двома областями. Така область маскується на цільовій області для вимірювання подібності.

3.3.3 Трансформація пікселів

Для оцінки трансформування координат x та y у двох зображеннях використовуємо метод взаємної інформації, типовий для вимірювання подібності на основі інтенсивності. За цим методом співставляються два зображення на основі вимірювання їх статистичної кореляції. Значення взаємної інформації MI зображень A і B можна обчислити використовуючи наступне рівняння, де більше значення вказує на більшу подібність між двома зображеннями:

$$MI(A, B) = H(B) - H(B|A) = H(A) + H(B) - H(A, B), \quad (3.2)$$

де $H(A)$ та $H(B)$ ентропія зображень A і B , $H(A, B)$ спільна ентропія зображень A і B .

Ці параметри обчислюються за формулою:

$$H(A) = - \sum_a p_A(a) \log_{p_A}(a), \quad (3.3)$$

$$H(B) = - \sum_b p_B(b) \log_{p_B}(b), \quad (3.4)$$

$$H(A, B) = - \sum_{a,b} p_{A,B}(a, b) \log_{p_{A,B}}(a, b), \quad (3.5)$$

де $h(a,b)$ спільна гістограма двох зображень A і B .

Спільна гістограма двовимірною, а та b координати пікселя зображення A та B відповідно.

Щоб оцінити трансформацію на рівні пікселів між еталонним а коректуючим зображенням, використовуємо метод пірамідального представлення та метод взаємної інформації [22]. Обчислення значення МІ з вихідного зображення є не тільки затратним у часі, а і може спричинити перебільшення локального екстремуму через обмежений простір пошуку. Тому для більш грубого зображення отриманого пірамідальним методом, який поступово зменшує просторову роздільну здатність зображення, початкове значення трансформації оцінюється за допомогою методів оптимізації, яка розглядає МІ як цільову функцію. За допомогою такого методу встановлюється значення МІ як цільової функції та застосувати метод оптимізації для найбільш грубого рівня пірамідального представлення. Трансформація в напрямках x та y стає початковою точкою наступного процесу оптимізації пірамідального методу.

3.3.4 Кореєстрація

Типова процедура кореєстрації зображень включає три етапи [23]:

- вибір і узгодження гомологічних пар точок;
- оцінка моделі реєстрації та обчислення помилок;
- кореєстрація зображень за допомогою оціночної моделі.

Найскладніша частина часто лежить на першому кроці. У декількох роботах, для першого кроку проводилося дослідження автоматичного вибору гомологічних точок. Однак, більшість із них спрямовані на множину оптичних зображень. Автоматична кореєстрація оптичних та радарних зображень потребує додаткових досліджень. На практиці, метод відбіру гомологічних точок часто застосовується завдяки його ефективності, оскільки він використовує переваги людського сприйняття. Основна проблема вибору гомологічних точок - це трудомісткий процес. Було запропоновано кілька автоматичних підходів для вибору гомологічних точок із зображень різних джерел. Багато з цих методів засновані на таких методах, як метод SIFT. Проте більшість із цих методів були запропоновані для кореєстрації між двома оптичними зображеннями та ґрунтувалися на інтенсивності зображень. Через різкі відмінності між пасивними та активними режимами роботи, кореєстрація між оптичним та радарними зображеннями виявляється набагато складнішою. Розроблений підхід складається з наступних двох основних етапів.

Перший етап - генерація початкових гомологічних точок.

Спочатку, ряд початкових гомологічних точок вибирається автоматично на основі процедури узгодження області. Ця процедура проводиться, використовуючи підхід відповідності на області, порівнюючи значення сірої шкали двох відповідних зображень. Приймаємо цифрове число в одній смузі оптичного зображення та значення інтенсивності однополярного радарного зображення для порівняння, з метою знаходження початкових гомологічних точок. Розмір даної області залежить від роздільної здатності зображень та приблизного співвідношення між оптичним та радарним зображеннями. Обираємо розмір області пошуку у 81×81 пікселів. Ця автоматична процедура генерації початкових гомологічних точок може бути виконана за допомогою програмного забезпечення ENVI 4.8 [24].

Другий етап - регулювання гомологічних точок та кореєстрація.

Налаштування початкових гомологічних точок є критично для кореєстрації. Основний принцип полягає в ітеративному зменшенні випадкової помилки кожної пари гомологічних точок, обраної на етапі початкової генерації. Емпірично, під час вибору

гомологічних точок з оптичних та радарних зображень, функції з оптичних зображень часто вибираються легко з заданною просторовою роздільною здатністю. Однак при виборі відповідних точок із радарних зображень, завжди важко досягти точного вибору через шуми та спотворення від бокового механізму візуалізації. Шуми і спотворення створюють великі труднощі при виборі гомологічних точок на невеликих територіях, таких як околиці 3 на 3 або 5 на 5. Отже, ця невизначеність від шумів і спотворень призводить до випадкової помилки для кожної пари гомологічних точок. Однак гомологічні точки на цілих зображеннях повинні відповідати математичним зв'язкам, які можна описати афінним перетворенням. Таким чином, випадкова помилка може бути ідентифікована та виведена з цієї математичної моделі. Нехай афінна модель перетворення цього зв'язку обмежується однією і тією ж роздільною здатністю, а також всесвітньою системою геодезійних параметрів WGS84 (англ. World Geodetic System 1984) та універсальною системою координат поперечної проекції Меркатора (англ. UTM - Universal Transverse Mercator) [25]. RMSE використовується для представлення випадкової помилки. Для зменшення RMSE застосуємо ітераційний процес, регулюючи розташування відповідних точок у радарних зображеннях за допомогою афінної моделі перетворення.

Автоматичний алгоритм оптимізує початкові гомологічні точки, що підлягають заданому порогу RMSE спільної кореєстрації. RMSE – це один із загальних методів оцінювання ефективності кореєстрації. RMSE можна обчислити за допомогою рівняння (3.6):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{I}_i - I_i)^2}{N}}, \quad (3.6)$$

де N - кількість гомологічних пар, I_i - фактична координата розташування обраної точки i , \hat{I}_i – задана координата точки i за вибраним методом кореєстрації. Якщо RMSE застосовується до x координат гомологічних пар, то RMSE у напрямі x може

бути розраховано і позначено як R_x . Аналогічно можна обчислити R_y . Процедура автоматичної кореєстрації ґрунтується на автоматичному налаштуванні початкових гомологічних пар шляхом оптимізації R_x і R_y в ітераційному процесі. Таким чином, середнє значення RMSE можна зменшити, скоригувавши геолокації вихідних гомологічних пар. Ітерації зупиняються, коли досягається заданий поріг RMSE.

Алгоритм процедури коригування наступний. На вхід алгоритму входять N пар початкових гомологічних точок з їх кореєстрованими RMSE у напрямках x та y , та пороговим значенням T . Алгоритм починається з серії ітерацій, регулюючи розташування гомологічних точок крок за кроком на основі RMSE, так що RMSE зменшується під час цієї процедури коригування [26]. Алгоритм припиняється, коли RMSE дорівнює або менший, ніж заданий поріг T . Теоретично, число (N) початкових пар гомологічних точок не має прямого зв'язку з порогом T . Число N було отримано з процедури узгодження області на першому етапі, і воно визначалося конкретною сценою зображення, узгодженням оптичного та радарного зображень та алгоритмом відповідності. Теоретично, N повинно бути рівним або більшим, ніж ступінь полінома для опису двох зображень, і, як правило, для якіснішої кореєстрації, краще вище. Однак поріг T визначався кінцевою вимогою до реєстрації. Значення T , емпірично встановлено як 0,01 [27].

Вхідні дані: N пар початкових гомологічних точок $\{P_i(x, y) \mid i \in [1..N]\}$, RMSE N пар - $R[1..N]$, RMSE по x напрямку N пар - $R_x[1..N]$, RMSE по y напрямку N пар - $R_y[1..N]$, і заданий поріг T для всіх значень RMSE.

Вихід: N пар відрегульованих гомологічних точок $\{P'_i(x, y) \mid i \in [1..N]\}$

S1 призначити початкове $P_i(x, y)$ до $P'_i(x, y)$.

S2 сортувати значення RMSE $R[1..N]$ та відповідні $R_x[1..N]$ і $R_y[1..N]$ всіх пар точок у порядку зменшення, щоб отримати відсортовані значення RMSE: $R'[1..N]$, $R'_x[1..N]$ і $R'_y[1..N]$;

Нарешті, за допомогою відрегульованих гомологічних пар точок оптичні та радарні дані можуть бути кореєстровані. Оскільки геореференційні системи були геокодировані в одній і тій же системі для оптичного та радарного зображення перед

корееєстрацією, як модель реєстрації використовується афінна модель перетворення [28]. Визначивши модель для оцінки за допомогою гомологічних точок, спільна корееєстрація може бути виконана з цим кроком.

4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Вимоги до програмного забезпечення

Незважаючи на високу якість у найсучаснішому орторектифікаційному програмному забезпеченні, моделях камер та цифрових моделях висот, два орторектифіковані зображення однієї і тієї ж області часто мають помилки відносно один одного.

Хоча абсолютна геометрична точність, як правило, відмінна, відносна точність кореєстрації зображення-зображення може бути покращена [29]. Для автоматизованого виявлення змін у розмірі одного пікселя відносна точність двох незалежно створених знімків часто є низькою.

У цьому розділі описано розроблення програмного забезпечення, яке застосовує кілька методик для досягнення точності субпікселів при кореєстрації пари зображень – оптичного і радарного.

Основні цілі створення програмного забезпечення:

- розробити програмне забезпечення для точного налаштування кореєстрації зображень, припускаючи, що зображення вже орторектифіковані;
- створити програму, яка може бути інтегрована в інше програмне забезпечення;
- забезпечити розширення функціоналу для задання більшої кількості параметрів при обробці супутникових зображень;
- забезпечити автоматичне тестування для кількісного аналізу.

Головні функції, що мають бути реалізовані у програмному забезпеченні:

4.2 Реалізація розробленого модифікованного алгоритму

Реалізація розроблена у MVC-Design (Model-View-Controller). Це дозволило відокремити опис коду (об'єктів) від інтерфейсу, в цьому випадку графічного інтер-

фейсу користувача, написаного у стандартній бібліотеці SWING, і логічної або оперативної частини коду, яка містить, наприклад, алгоритм сегментації або класифікації.

Розроблена таким чином програма має явну перевагу обміну або додавання додаткових компонентів до програми, без необхідності переписувати все.

Для підтримання певного порядку в збереженні вихідних файлів використовуються пакети для цих різних частин і, таким чином, створюється також фізичне розділення файлів відповідно до базової теоретичної концепції.

Проект складається з головного пакету з назвою `edu.kth.gis` і має наступну структуру (рисунок 4.2):

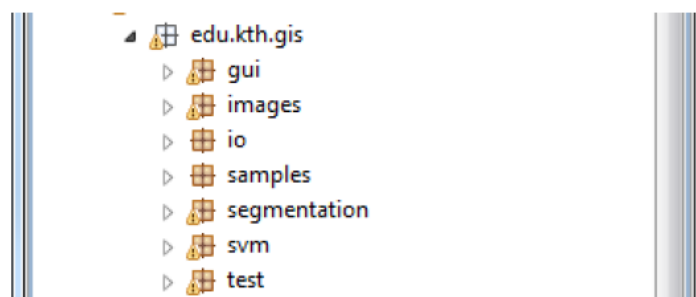


Рисунок 4.2 – Структура програми

Крім коду, збереженого у цих пакетах, також існує велика кількість зовнішніх бібліотек з різних проектів з відкритим кодом, що полегшили створення безлічі необхідних функцій навколо кореєстрації та сегментації, наприклад, імпорт зображень geo-tiff або експорт обчислених геометрій у формат файлу. На рисунку 4.3 зображено перелік цих бібліотек.

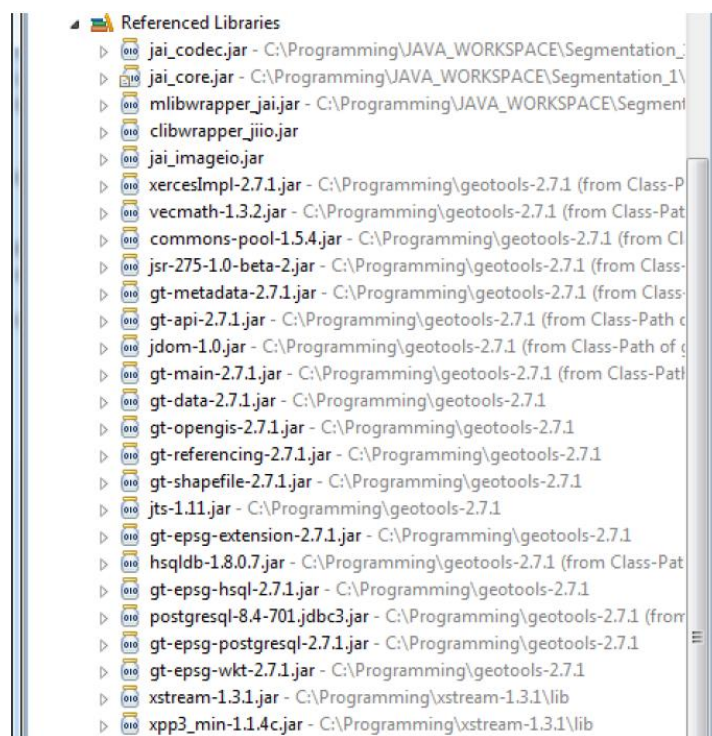


Рисунок 4.3 – Список використаних бібліотек

Обробка зображень є одним із ключових елементів для отримання доступу до даних, необхідних для кореєстрації і сегментації. Це також дуже важливо для негайної візуальної інтерпретації якості створених сегментів.

Бібліотека, яка використовується для обробки зображень – JAI (Java Advanced Imaging), а для імпорту – JAI-imageio – розширення до JAI, що підтримує всі види форматів зображення для перетворення в `PlanarImage`, який є внутрішнім класом репрезентацій для зображень в рамках JAI [30]. Навіть незважаючи на те, що JAI надає певну підтримку для geo-tiff, для спрощення доступу до гео-ключів використовується ще один клас під ліцензією з відкритим кодом (`GeoTiffIOMetadataAdapter` від Майка Ніделя).

У поточній версії дані потрібно надати у форматі tiff або geo-tiff, щоб зробити можливою кореєстрацію і сегментацію. Останнє потрібно, якщо обчислені сегменти мають бути геопосиланнями.

Створений клас `TiffUtil` статично оброблює зчитування зображень з tiff-файлу. Декілька методів маніпулювання зображеннями, в основному використовуються для покращення відображуваних зображень. Ці методи потрібні для масштабування N-

бітового зображення до М-бітового зображення, де N і М - довільні числа, задання порогового значення гістограми для обрізання сірого масштабу і вирівнювання або нормалізації гістограми для оптимального використання наявних рівнів сірого кольору при відображенні. Слід зазначити, що всі ці маніпуляції виконуються лише на зображенні, що відображається на екрані. Алгоритм сегментації працює на незмінних даних із вхідного файлу.

Програма розроблена таким чином, що спочатку, на етапі попередньої обробки, іде перевірка наявності хмар на зображенні. Якщо рівень вмісту хмар перевищує вказаний ліміт (за замовчуванням ліміт встановлюється на 80% сцени, але його можна змінювати відповідно до вимог проектного рішення), тоді програмне забезпечення буде переведено на напівавтоматичний режим, коли ручне втручання необхідне для позначення ключових точок на зображеннях. Програмне забезпечення оснащено інструментами редагування точок для маркування нових точок, видалення точок і переміщення точок. Інструмент редагування точок потрібен, якщо у процесі виявлення ключових точок не було знайдено жодної, або виявлені точки не коректні. Якщо вміст хмари в межах визначеної межі (менше 80%), процес кореєстрації буде автоматичним. На рисунку 4.1 показано графічний інтерфейс (GUI).

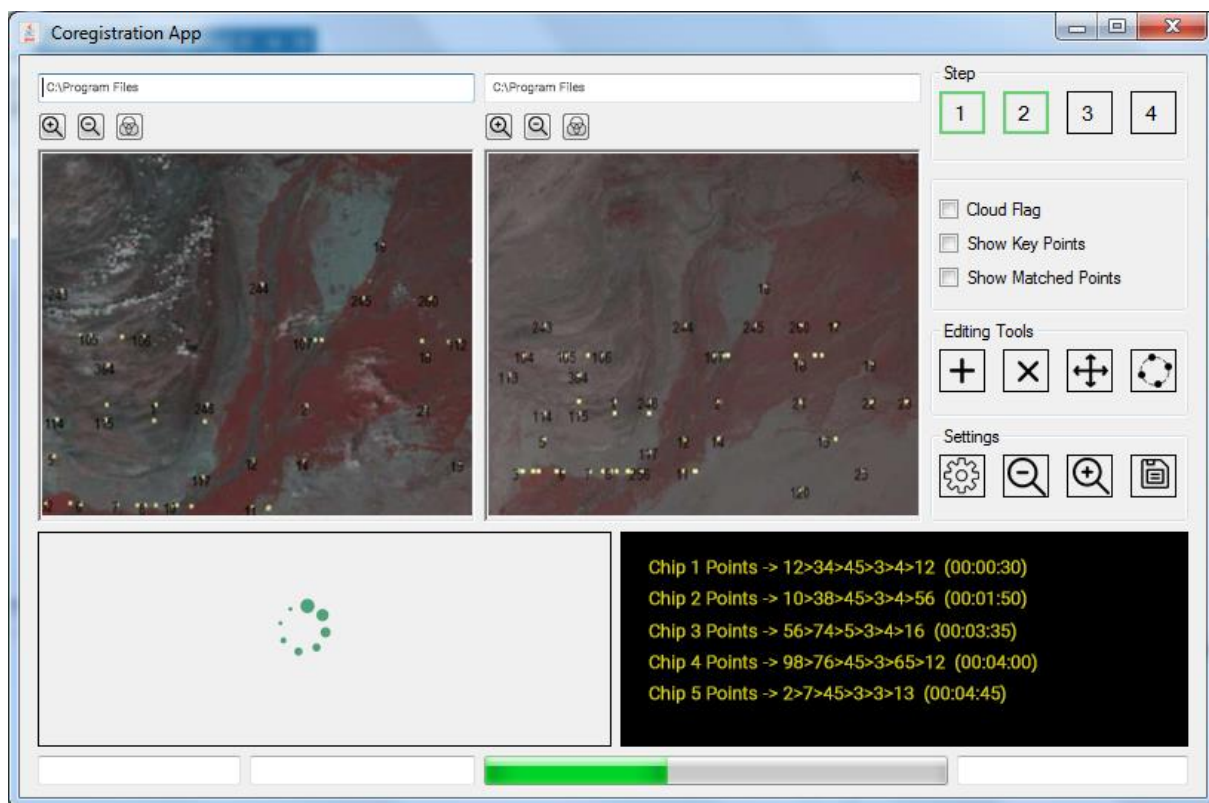


Рисунок 4.1 – Інтерфейс програми

Практично до кожної частини написаного коду можна отримати доступ через графічний інтерфейс. Інтерфейс розділений на два кадри. Початковий кадр (мал. 10) призначений для введення та виводу операцій, а також надання огляду вхідних даних. При запуску програми відображається порожній кадр. На панелі меню можна відкрити файл зображення за допомогою попередньо визначеного відкритого діалогового вікна. Як тільки вибір файлу підтверджено, з'являється ще одне діалогове вікно із відображенням усіх доступних діапазонів. З цього діалогового вікна можна вибрати три діапазони, які використовуються для відображення. Коли вибрані потрібні смуги, вони відображаються у ContentPane початкового кадру у вигляді кольорового композиту RGB. Діалогове вікно вибору смуги та кадр із завантаженим зображенням можна побачити на малюнку нижче. Тут розміщено фальшивий кольоровий композит із інфрачервоним (3), червоним (1) та зеленим (2).

Зображення вбудоване у так звану панель прокрутки, яка дає змогу відображати та переміщуватися по зображеннях, що перевищують розмір кадру. Покращення зображення для відображення цілей виконується автоматично у фоновому режимі.

Завантажене друге зображення відкривається у першому вікні. У другому вікні відображається результат кореєстрації у вигляді векторного накладання на зображення зображень, раніше показаних в першому вікні. Меню налаштувань містить інструменти для експорту кореєстрованих файлів, параметри відображення, вибір навчальних зразків для svm та нарешті виконання svm.

Наразі результат кореєстрації можна зберегти у форматі ESRI. Крім того, зберігається файл csv, який містить усю додаткову інформацію, створену в рамках програми JAVA. Це середні та дисперсійні значення для кожної смуги у кожному сегменті, а також область та периметр кожного сегмента і унікальний ідентифікатор та присвоєний клас. Можна також просто зберігати файл csv і не зберігати файл shp. Це може бути використано, коли потрібно просто зберегти сегменти, які були позначені до проведення класифікації svm. Тоді також можна перезавантажити дані атрибутів з файлу csv для редагування навчальних сегментів. Таке рішення було необхідним, оскільки поточна реалізація не дозволяє ефективно економити та реімпортувати основні об'єкти java шляхом будь-якої серіалізації.

Параметри відображення, доступні в меню перегляду, дозволяють збільшувати і зменшувати масштаб, а також змінювати колір відображених сегментів.

4.3 Результати роботи реалізованого модифікованого алгоритму

Щоб отримати цільову область з даних SAR для виявлення подібності з оптичними даними, критерії створення квадратурної структури повинні бути визначені заздалегідь. Поріг критерію розщеплення $Q(S_i)$ було встановлено як 2, а мінімальні та максимальні розміри підрегіонів для структури квадрата було встановлено відповідно 32×32 та 128×128 пікселів [31]. Області, які досягли мінімального розміру, були замасковані з цільової області, оскільки ці області можуть викликати радіометричні та геометричні відмінності між зображеннями. Роль субрегіона максимального розміру полягає у витягуванні рівномірно розподілених точок відповідності по всьому зобра-

женню шляхом побудови областей сітки, де одна точка узгодження витягується з кожної області. Після того, як цільова область для вимірювання подібності була вилучена із зображень SAR, ця витягнута область була використана для оцінки значення ІМ за допомогою оптичного зображення для оцінки різниці перекладу між ними. Для оцінки значення МІ ми використовували всі пікселі на відповідних зображеннях, як при обчисленні значення, а потім встановлювали кількість відсіків гістограми до 64 (шість біт). Обчислене значення МІ під час зміни початкового перекладу у напрямку x (схід) та y (північ) було вибрано як значення оптимізованої цільової функції. Імітаційний відпал використовувався для мінімізації цільової функції на найгрубішому рівні піраміди зображення та симплексного алгоритму неодноразово використовувався від наступного до найтоншого рівнів (оригінальне зображення). Розмір самого грубого рівня визначали 256×256 пікселів (тобто області 1 і 2 двічі пройшли ресемплінг (зменшений рівень 2), а область 3 була зменшена у чотири рази (знижений рівень 4)). Беручи до уваги геометричну похибку розташування в SAR та оптичних зображеннях, область пошуку для оцінки оптимального значення за імітований відпал встановлювали як 200 м у напрямку x і y відповідно.

Оцінка глобальної трансформації x та y напрямків кожної області надається в Таблиці 4.1. Важливо зауважити, що початкова різниця на області 3 нижча, ніж на інших областях, оскільки зображення були виправлені через DEM. Лінійні функції були виявлені оператором Кенні і відповідні точки були вилучені, задовольняючи найменше значення функції витрат у кожному підрегіоні, побудованому структурою квадродерева. Два пороги t_0 і t_1 для вилучення лінійних ознак оператором контурів Кенні було встановлено 0,06 і 0,15 відповідно. Поріг функції витрат для вилучення відповідної точки крок встановлювали на 1,0, а вагові коефіцієнти α і β встановлювали на 0,2 і 500, відповідно, у всіх випадках. Для порівняння, результат вилучення відповідної точки без застосування квадродерева також було проведено.

Таблиця 4.1 – Оцінка трансформації

Сцена	Супутники		Якість	
	Радарний	Оптичний	x(E)	y(N)
Сцена 1	Sentinel-1	Sentinel-2	93.26	32.39
Сцена 2	Sentinel-1	Sentinel-2	-140.16	-38.79
Сцена 3	Sentinel-1	Sentinel-2	4.30	9.83

В результаті роботи алгоритму (враховуючи лише функцію початкове трансформування) маємо таку кількість ключових точок що співпали на обох зображеннях: 377 на першій сцені, 388 на другій і 1262 на третій. Хоча було виділено достатньо ключових точок для побудови нелінійної моделі трансформації, вибір цих точок призведе до значних похибок при корестації, якщо враховувати лише просторову інформацію про відстань та орієнтацію між. Зокрема, дані SAR демонструють сильну зворотну розсіюваність навіть у регіонах, що мають невелику шороховатість поверхні або незначну зміну висоти рельєфу. Це означає, що для регіонів, розташованих поблизу цієї місцевості, можна витягти велику кількість точок відповідності шляхом надмірного виявлення лінійних ознак. Якщо точки вибрані аби оцінити модель трансформації, не можна гарантувати хорошу точність корестації [32]. Тому ми дістали лише одну точку відповідності, що має найменше значення функції вартості в кожному підрегіоні, породженому квадродревом.

З запропонованого способу було вилучено 53, 61 та 495 точок відповідності оптичного і радарного зображення на ділянках 1, 2 та 3 відповідно. Оцінити розподіл точок відповідності, якість розподілу, був розрахований індекс, який оцінює, як точки рівномірно розподілені. У таблиці 4.2 наведено порівняння вилученої кількості точок

відповідності та значення якості розподілу. Результати запропонованого способу показав низькі значення якості розподілу на всіх сценах, що вказує на відповідність точок рівномірно розподілених точок на всьому зображенні.

Таблиця 4.2 – Порівняння вилучених точок та якості розподілу

Сцена	Співпадаючі точки		Якість	
	Без квадродерева	З квадродере- вом	Без квадродерева	З квадродере- вом
Сцена 1	377	53	0.253	0.175
Сцена 2	388	58	0.237	0.120
Сцена 3	1262	495	0.317	0.209

Отримані точки відповідності були використані для побудови моделі перетворення, яка поєднує лінійну функцію та глобальну афінну трансформацію. Використовуючи модель, радарне зображення було перетворено відповідно до координат оптичного зображення.

Таблиця 4.3

Сцена	PRMSE (m)		CE90 (m)	
	Без квадродерева	З квадродере- вом	Без квадродерева	З квадродере- вом

Сцена 1	3.41	2.14	4.91	3.27
Сцена 2	3.35	2.29	5.00	2.76
Сцена 3	2.01	1.54	3.05	2.30

5 СТАРТАП

5.1 Опис ідеї проекту

Основною метою роботи є розробка програми, що буде проводити процес кореєстрації оптичних і радарних супутникових знімків. Програмне забезпечення базується на модифікованому алгоритмі кореєстрації, що використовує обчисленням ключових точок за виділенням осознак та виділенням рівня сірого кольору у пікселях. Дана технологія здатна забезпечити високу точність кореєстрації даних з різних сенсорів, у порівнянні з іншими способами.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
	Агро сфера	Моніторинг полів, моніторинг стану ґрунту
	Воєнна сфера	Використання у розвідці
	Картографія	Оновлення існуючих та складання нових карт
	Моніторинг лісу	Пошук лісових пожеж, моніторинг стану лісових посадок, аналіз впливу погодних умов на лісові посадки

Використання існуючих алгоритмів не є оптимальним для проведення кореєстрації оптичних і радарних супутникових знімків, через особливості кожного виду знімків [33].

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких і нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів				Сильна сторона	Нейтральна сторона	Слабка сторона
	Мій проєкт	QGIS	SNAP	СКАНЭКС			
Вартість ПЗ	Низька	Низька	Низька	Висока	+		
Час обробки	Низький	Високий	Середній	Низький		+	
Автоматизація	70%	70%	80%	40%		+	
Споживачі (відомий бренд)	-	+	-	+			+

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

У таблиці 5.3 проведено аналіз складових, що є необхідними для аудиту технології, за допомогою якої реалізується даний проєкт.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Модифікований алгоритм кореєстрації оптичних і радарних знімків	Програмна реалізація написана на мові Java, що дає змогу використовувати даний продукт у розповсю-	Наявні	Так

	дженій операцій- ній системі Windows		
--	--	--	--

Обраною технологією є модифікований алгоритм кореєстрації оптичних та радарних супутникових знімків із реалізацією у вигляді програми. Для роботи у програмі необхідний набір вхідних супутникових даних.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Головною перевагою та характеристикою даного продукту є співвідношення ціни та можливостей, що відповідають високому рівню якості. Зависока ціна іноземних аналогів, не автоматизований процес роботи, робить даний товар перспективним для застосування як в Україні, так і за кордоном.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	0, тільки закордонні, немає аналогів в Україні
2	Загальний обсяг продаж, ум. од/час	Поодиначний продаж закордонних товарів. В середньому – 500 доларів за річний доступ
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Технологія потребує ресурсів, практичної перевірки та доробки універсального алгоритму

5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Не потребує сертифікації
6	Середня норма рентабельності в галузі , %	55

Аудиторією, на яку орієнтований продукт, є компанії, що розробляють системи моніторингу у галузі сільського господарства, моніторингу лісів та компанії, які займаються картографуванням. Розповсюдження програмного забезпечення відбудеться через дистриб'юторів або представників. Алгоритм є універсальним, без залежності від рекомендацій компаній та сфери діяльності.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Параметри	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у плевдінці різних цільових груп клієнтів
Дешевизна алгоритму		Компанії, що розробляють програмне забезпечення для моніторингу сільського господарства	
Зменшення похибок		Установи, що контролюють стан лісів	
Зменшення ризику виникнення людського фактору		Установи, робота яких пов'язана з космічними дослідженнями	

Використовувати закордонний аналог за українською ціною		Військовий сектор	
---	--	-------------------	--

Для досягнення необхідного рівня конкурентоспроможності, необхідно забезпечити ефективну рекламу та кваліфікований персонал.

Таблиця 5.6 – Фактори ризику

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Конкурентоспроможність	Новий товар на ринку, невідомий бренд, конкурентоспроможність	Реклама, залучення дистриб'юторів, інвесторів
Невідомий товар	Невідомий товар невідомої фірми	Розкрутка товару
Комерційна таємниця	Можливість відкриття технології новим працівникам	Підписання договорів про конфіденційність

Головною можливістю є залучення іноземних інвесторів та можливість інтеграції в існуючу систему.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Залучення іноземних інвесторів	Залучення інвестицій	Укладання контрактів
Співпраця з дослідницькими інститутами	Співпраця, для подальшої роботи над алгоритмом	Пошук та налагодження контактів з компаніями, державними установами

Далі розглянуто конкуренцію на ринку. Результати ступеневого аналізу подані у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємництва
Тип конкуренції	Монополія, на даний час в Україні немає аналогів	Розкрутка національного товару
Рівень конкурентної боротьби	Міжнаціональний	Випуск аналогу закондорних продуктів
Галузева ознака	Внутрішньогалузева	Використовується в багатьох сферах, де потрібен моніторинг на основі супутникових даних
Конкуренція за видами товарів	Товарно-родова	Власні розробки, унікальна технологія
Характер конкурентних переваг	Цінова	Ціна нижча за іноземні аналоги
Інтенсивність марочка/не марочна	Не марочна	Реклама, покращення

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що навіть при наявності явного лідера на ринку, у даного проекту є можливість здобути першість в Україні та світі за рахунок більш точного процесу кореєстрації радарних та оптичних знімків.

Більш детальний аналіз конкуренції на ринку було виконано за моделлю п'яти сил М.Портера, результати наведені у таблиці 5.9.

Робота на ринку можлива, тому що відсутні прямі конкуренти, а ринок потребує оптимізації у всьому. Сильними сторонами алгоритму є його унікальність та швидкість роботи для будь-якого об'єкту.

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М.Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
	QGIS, SNAP, СКАНЭКС	Визначити бар'єри входження на ринок	Відсутні	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз збоку заміників
Висновки: ринок є насиченим, пряма конкуренція є, але в межах України є конкурентна боротьба неінтенсивна		Науково-дослідні інститути	Зазвичай постачальники не диктують умови співпраці	Науково-дослідні інститути	Програми для обробки супутникових даних

Матеріальна спроможність установ та потенційних клієнтів є важливим фактором в роботі та розвитку стартапу. Необхідно враховувати характеристики ідеї, вимоги споживачів до товару та фактори маркетингового середовища, для визначення факторів конкурентоспроможності. Аналіз факторів конкурентоспроможності оформлюється на основі таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
Час	Менша необхідність машинної праці та економія часу.
Ціна	Ґрунтується на собівартості - отже є нижчою
Якість	Не гірша за закордонні аналоги

В результаті обґрунтування факторів конкурентоспроможності стало ясно, що існує фактор якості та гнучкості, який обумовлює необхідність розробки проекту, який міг би конкурувати за факторами результативності, тобто можливості досягнення кінцевого результату, простоти експлуатації, ціни, а також надавати технічну допомогу й обслуговування.

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін алгоритм

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з власною компанією						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Цінова політика	15						+	
Обслуговування	19					+		
Якість матеріалів	12			+				
Готова методика виготовлення	10			+				
Модульність	17							+
Репутація	10				+			

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), що наведені в таблиці 5.12, на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін, що наведені в таблиці 5.11. SWOT-аналіз стартап проекту дає зрозуміти, що сильними сторонами проекту є низька собівартість, а тому і ціна продукції можливість зробити систему, яка буде стабільно постачати інформацію.

Таблиця 5.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Собівартість Ціна Рентабельність	Слабкі сторони: Невідомий бренд Великі капіталовкладення Необхідність встановленого додаткового ПЗ
Можливості: Вихід на закордонний ринок Забезпечення споживчих потреб Дохід	Загрози: Викриття комерційної таємниці Недостатня реалізація

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів у таблиці 5.13.

Обраною альтернативою є залучення рекламної кампанії, розкрутка нової технології.

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Практичне використання алгоритму, вдосконалення	+	1,5 роки
Залучення іноземних фахівців	+	1 рік
Рекламна кампанія	+	2 роки
Отримання міжнародних сертифікатів	+	2 роки
Вихід на закордонний ринок	+	3 років

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис груп потенційних споживачів

Таблиця 5.14 – Опис груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтований попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Науковий	Висока	Високий	Інтенсивна	Висока складність
Аграрний	Висока	Високий	Інтенсивна	Висока складність

Обрано цільові групи: науково-дослідні інститути, розробники програмного забезпечення для сільського господарства, розробники програмного забезпечення для моніторингу лісів.

Обрані цільові групи готові сприйняти продукт, оскільки попит на продукцію в цільових групах високий. Інтенсивність конкуренції в сегменті в рамках України не є значною, а вхід у сегмент є легким.

Для роботи в обраному сегменті ринку сформована базова стратегія розвитку, дані наведено у таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Перехід підприємства в режим економного виробництва	Швидке підлаштування виробництва під мінливий ринок	Можливість зменшити вартість програмного забезпечення за рахунок введення додаткового платного функціоналу	Стратегія лідерства по витратах

Базова стратегія конкурентної поведінки - стратегія позиціонування, оскільки вона є найбільш доцільною. Позиціонування на особливостях технології є найважливішим і саме так компанія показує унікальність продукту та чим він корисний для споживача. За допомогою таблиці 5.16 визначено базову стратегію конкурентної поведінки.

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурентна?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Буде шукати	Ні, продукт застосовує власний алгоритм для ПЗ.	Розширення первинного попиту

Обравши стратегію розширення первинного попиту, компанія показує унікальність, користь продукту, оскільки продукт не є «першопрохідцем» на ринку.

Визначення стратегії позиціонування наведено у таблиці 5.17.

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Якість	Розширення первинного попиту	Точність	Точність, гнучкість, модульність

Продовження таблиці 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Обслуговування	Розширення первинного попиту	Легка інтеграція в інші системи	Інтеграція, модульність, довгострокова гарантія
Ціна	Наступальна	Доступна цінова політика, висока якість.	Гнучкість, доступність, якість

Основними вимогами до товару цільової аудиторії є якість, ціна, обслуговування. Комплексна позиція проекту формується з таких асоціацій: точність, інтеграція, доступність.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Опис трьох рівнів моделі товару наведено у таблиці 5.19. Аналіз показав, що перевагою продукту є швидкість, точність і сумісність. Проект буде захищено від копіювання за рахунок захисту інтелектуальної власності.

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
	Точне визначення ключових точок, і відповідно точна кореєстрація	Унікальний метод визначення ключових точок і співставлення зображень є лише у нас
	Можливість ручного визначення ключових точок	Ручне підвищення точності
	Можливість інтеграції в існуючу систему	Широка аудиторія, що зацікавлена у постугах

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Система автоматизованої кореєстрації оптичних і радарних супутникових знімків		
	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Висока швидкість 2.Точність 3. Сумісний з більшістю ПК		
	Якість: стандарти якості постачання програмних продуктів		
	Пакування: вебсервіс		
	Програмний продукт		
	Доступ по підписці		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист інтелектуальної власності.			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.20).

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни (із розрахунку на 1 рік користування)

Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
Від 7000 грн	8000-15000 грн	15-30 тис. грн	7500 – 9500 грн

Аналіз рівня цін на товари замітники, рівень цін на товари аналоги та рівень доходів цільової групи споживачів показав оптимальні межі встановлення ціни на товар від 7500 грн до 9500 грн за річну підписку, що дає цінову перевагу перед товарами конкурентів.

Формування системи збуту зроблено на основі таблиці 5.21.

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Через загальнодоступні канали	Донесення інформації до аудиторії забезпечення послуги	Один рівень	Комбінований канал збуту

Для визначення концепції маркетингових комунікацій, необхідно врахувати, що цільові клієнти більшу частину інформації про нові товари отримують через конференції, семінари та публікації (дані таблиці 5.22).

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Довіра до технологічних інженерів, що рекомендують товар	Виставки, конференції, семінари, наукові журнали.	Налагодження контактів з будь-якими установами, які мають потребу ідентифікації користувачів	Поширення знань про продукт, інформація про випробування товару	Продемонструвати переваги перед існуючим товаром

ВИСНОВКИ

Однією з тенденцій останнього десятиліття у сфері дистанційного зондування Землі з космосу став комплексний підхід до обробки даних: спільне використання даних різних інструментів, у тому числі, оптичних і радіолокаційних. Оскільки кожен з названих методів спостереження Землі володіє як перевагами, так і обмеженнями в застосуванні, що мають різну природу, об'єднання таких різних даних відкриває нові можливості та є дуже ефективним, в порівнянні з роздільною обробкою, за рахунок розширення об'єму одержуваної інформації завдяки як взаємодоповнюваності, так і взаємозамінності. Незважаючи на зростаючий інтерес до спільного використання оптичних і радарних знімків, проблема їх кореєстрації залишається актуальною. Кожен тип знімку має свої особливості та проблемні моменти, які необхідно враховувати при кореєстрації.

У магістерській дисертації досягнуто поставленої мети – розроблено модифікований алгоритм для підвищення якості кореєстрації. Для досягнення мети було виконано наступні завдання: проаналізовано об'єкт та предмет дослідження, проведено аналіз існуючих методів кореєстрації, визначено вимоги до системи, створено модифікований алгоритм кореєстрації, реалізовано програмне забезпечення на основі розробленого алгоритму та проведено аналіз для реалізації проекту як стартапу.

У першому розділі проведено огляд особливостей оптичних та радарних знімків, виявлено проблемні моменти, які перешкоджають проведенню коректного процесу кореєстрації з метою врахування їх при розробці власного алгоритму. Описано тенденції розвитку дистанційного зондування Землі. Визначено які вимогам мають задовольняти супутникові знімки та вихідні дані після кореєстрації в залежності від сфери подальшого застосування цих знімків.

У другому розділі проведено огляд існуючих методів кореєстрації. За допомогою програмного забезпечення MATLAB проведено експериментальний аналіз опи-

саних існуючих методів кореєстрації з метою виявлення слабких і сильних сторін існуючих методів. Описано існуючі програмні реалізації, їх переваги та недоліки, для подальшого створення власної вдосконаленої системи.

У третьому розділі розроблено модифікований алгоритм кореєстрації оптичних і радарних знімків. Алгоритм який поєднує два методи виявлення спільних ключових точок: перший базується на виявленні спільних властивостей, а другий – визначення інтенсивності пікселів сірого кольору. Запропонований алгоритм використовує структуру квадродерева для виявлення та усунення областей на знімку із різними геометричними та радіометричними властивостями, методом маскування. Використані у магістерській дисертації супутникові знімки взяті з відкритої платформи Copernicus.

У четвертому розділі реалізовано програмне забезпечення на основі розробленого модифікованого алгоритму мовою Java. Результати тестування алгоритму підтвердили працездатність алгоритму та високу точність його роботи.

У п'ятому розділі проведено перший етап розроблення стартап-проекту – маркетинговий аналіз стартап-проекту. Описано ідею проекту, можливі напрямки застосування, ключові особливості. Проведено технологічний аудит ідеї проекту та проаналізовано ринкові можливості запуску стартап-проекту. На основі вибору груп потенційних споживачів, визначення базової стратегії конкурентної поведінки та стратегії позиціонування розроблено ринкову стратегію проекту. Розроблена маркетингова програма стартап проекту. Зроблено висновок про доцільність подальшої імплементації проекту.

Реалізоване програмне забезпечення повністю виконує процес кореєстрації супутникових знімків, але не проводить багатьох етапів попередньої обробки супутникових знімків. Для цього система розроблялася таким чином аби можливою була інтеграція в іншу існуючу систему з реалізованою попередньою обробкою супутникових знімків. Результати реалізації модифікованого алгоритм кореєстрації сильно залежить від попередньої обробки супутникових даних. Трансформація зображень для накладання, ускладнюється при зміні масштабу на повороті знімків. Тому є доцільним подальше вдосконалення алгоритму.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чандра А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра. – Москва: Техносфера, 2008. – 312 с.
2. Рис У. Основы дистанционного зондирования / У. Рис, М. Б. пер. Кауфман, А. А. Кузьмевич. – Питер: Техносфера, 2006. – 346 с.
3. Балдина Е. А., Чеснокова О.А. Радиолокационное зондирование Земли для географических исследований // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2011. – № 1. – С. 16-21.
4. Брыксин В.М., Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Использование радарных изображений и DInSAR-PSInSAR технологии для мониторинга Западной Сибири и Арктики // Журнал радиоэлектроники [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – 2012. – №6. – 53 с. – Доступ: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/6/text.pdf>.
5. Кантемиров Ю.И. Обзор современных радиолокационных данных ДЗЗ и методик их обработки с использованием программного комплекса Sarscape // ООО «Компания Совзонд». Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой – 2011. – № 1.
6. Михайлов В.О. Применение радарной спутниковой интерферометрии для мониторинга смещений природных объектов: достижения и перспективы / Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Смольянинова Е. И., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. // ИФЗ РАН. Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте– 2013 – Секция №2.
7. Hanssen, R. F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis / R. F. Hanssen. – Kluwer Academic Publishers, 2001. – 308 p.
8. Кантемиров Ю. И. Применение космических радарных съемок для тематического картографирования и мониторинга изменений // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Зондирование земных покровов радарными и радиометрами с синтезированной апертурой – 2013 г. - №5 – с. 20-25.

9. Mahyoub S. Fusing of optical and synthetic aperture radar (SAR) remote sensing data: a systematic literature review (SLR) / S. Mahyoub, A. Fadilb, E. M. Mansour , H. Rhinanea, F. Al-Nahmia // . Remote Sensing and Spatial Information Sciences : The International Archives of the Photogrammetry, Volume XLII-4/W12, 2019 5th International Conference on Geoinformation Science, 10-11 October 2018, Casablanca, Morocco – Morocco, 2018 – с. 45
10. Бакланов А. И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения земли высокого разрешения / Филиал АО РКЦ «Прогресс»–НПП «ОПТЭКС». Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы – 2018 г. – Том 3, выпуск №3 – с. 17-28
11. Ергалиев Д.С. Геометрические искажения и геометрическая коррекция спутниковых снимков / Ергалиев Д.С., Тулегулов А.Д., Мусагулова Ж.С., Нысанбаева А.Б. // Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева. УДК 629.7.017.1 – 2013.
12. Skakun S. Automatic sub-pixel co-registration of Landsat-8 Operational Land Imager and Sentinel-2A Multi-Spectral Instrument images using phase correlation and machine learning based mapping / Sergii Skakun , Jean-Claude Roger, Eric F. Vermote, Jeffrey G. Masek & Christopher O. Justice // International Journal of Digital Earth – 2017 г. – № 3 – с. 1253-1269.
13. Griffiths P. Intra-annual reflectance composites from Sentinel-2 and Landsat for national-scale crop and land cover mapping / Patrick Griffiths, Claas Nendel, Patrick Hostertad // Remote Sensing of Environment – 2019 г. – № 220 – с. 135-152.
14. Baghdadi N. Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island / N. Baghdadi, N. Boyer, P. Todoroff, M. El Hajj, A. Bégué // Remote Sens. Environ. – 2009 г. – № 113 – с. 1724-1738.
15. Сафонов А.С. Построение SIFT-дескрипторов и нахождение особых точек на изображениях / А.С. Сафонов // Известия ТулГУ. Технические науки – 2017 г. – № 2

16. Использование метода SURF для обнаружения устойчивых признаков изображения при создании сферических панорамных снимков. // Математические структуры и моделирование. – 2011. – №22. – С. 95–100.
17. Супрун Д. Е. Алгоритм сопоставления изображений по ключевым точкам при масштабируемости и вращении объектов / Д. Е. Супрун. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. – 2016. – №5. – С. 86–99.
18. Евтюшкин А. В. Методы распознавания лесных ландшафтов на радарных и оптических космических изображениях / А. В. Евтюшкин, К. В. Казанцев, Д. Н. Лукьяненко. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Информатика. – 2010. – №3. – С. 45–51.
19. Palubinskas G. HOW TO FUSE OPTICAL AND RADAR IMAGERY? / Gintautas Palubinskas. // German Aerospace Center DLR. Remote Sensing Technology Institute. – 2012. – С. 4010–4013.
20. Shakti G. Determination of surface water area using multitemporal SAR imagery : дис. канд. / Shakti Gahlaut – Universität Stuttgart, 2016. – 119 с.
21. Combined Use of Optical and Synthetic Aperture Radar Data for REDD+ Applications in Malawi / M.Hirschmugl, C. Sobe, J. Deutscher, M. Schardt. // Institute for Information and Communication Technologies. MDPI. – 2018. – №7. – С. 116–135.
22. Clerici N. Fusion of Sentinel-1A and Sentinel-2A data for land cover mapping: a case study in the lower Magdalena region, Colombia / N. Clerici, C. Calderón, J. M. Posada. // Taylor and Francis Group. Journal of Maps. – 2017. – №2. – С. 718–726.
23. Sandberg M. Land cover mapping with multi-temporal SAR and optical satellite data : дис. канд. / Sandberg Monica – Aalto University, 2016. – 81 с.
24. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research / D.Roy, M. Wulder, T. Loveland, R. Anderson. // Remote Sensing of Environment. – 2014. – №145. – С. 154–172.
25. Giaquinto G. Optics and radar image fusion based on image quality assessment / G. Giaquinto, M. Giovenco, D. Ruess. // Institute of Sensor Systems. International Conference on Sensing Technology. – 2013. – №2013. – С. 45–52.

26. Mishra B. Optical and sar data integration for automatic change pattern detection / B. Mishra, J. Susaki. // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2014. – №7. – С. 24–40.
27. Joshi N. A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring / N.Joshi, M. Baumann, A. Ehammer, R. Fensholt. // MDPI. Remote sensing. – 2016. – №8. – С. 70–93.
28. Zhang H. An automatic co-registration approach for optical and SAR data in urban areas / H. Zhang, G. Li, H. Lin. // Annals of GIS. – 2016. – №3. – С. 235–243.
29. Li Z. Image coregistration in SAR interferometry / Z. Li, J. Bethel. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – №38. – С. 1–6.
30. Adaptation and evaluation of an optical flow method applied to coregistration of forest remote sensing images [Электронный ресурс] / G.Brigot, E. Colin-Koeniguer, A. Plyer, F. Janez // HAL. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01403019>.
31. Automatic image registration using free and open source software / [D. Giri Babu, S. Shekhar, K. Chandrasekar та ін.]. // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2014. – №8. – С. 1121–1128.
32. Wegner J. IMAGE ANALYSIS OF FUSED SAR AND OPTICAL IMAGES DEPLOYING OPEN SOURCE SOFTWARE LIBRARY OTB [Электронный ресурс] / J. Wegner, J. Inglada, C. Tison // Remote Sensing for a Changing Europe: Proceedings of the 28th Symposium of the European Association of Remote Sensing Laboratories, Istanbul, Turkey, 2-5 June 2008. – 2008. – Режим доступа до ресурсу: https://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/1-W51/paper/Wegner_inglada_tison.pdf.
33. Han Y. Automatic and accurate registration of VHR optical and SAR images using a quadtree structure / Y. Han, Y. Byun. // Taylor & Francis. International Journal of Remote Sensing. – 2015. – С. 2277–2295.